

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane Mira

Faculté de la Technologie



Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

## Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Télécommunication.

Spécialité : Réseau télécommunication.

### Thème

Optimisation des performances des démultiplexeurs à base des résonateurs en anneaux à cristaux photoniques.

Préparé par :

KHERBOUCHE AMIRA

FERDAD CYLIA

Dirigé par :

*R.BENDJELLOUL*

Examiné par :

*Mlle Y.ACHOUR.*

*Mr M.KHIEREDINE.*

Année universitaire : 2021/2022



## **REMERCIEMENT**

Avant tout, nous remercions le BON DIEU pour nous avoir aidés à accomplir ce présent travail.

Au nom de la science et de la technologie, au nom de la vertu du travail et de l'esprit d'élévation de la connaissance, nous tenons à exprimer tous nos respects à nos encadreurs Mme R. BENDJALLOUL, pour le sujet qu'elle nous a proposé, ses soutiens, ses précieux conseils et ses critiques positives. Nous adressons tout particulièrement à Mlle.ACHOUR, nos sincères reconnaissances et nos remerciements les plus vifs, pour l'honneur qu'elle nous a fait en acceptant la présidence du jury. Nous voudrions également exprimer nos remerciements à Mr M.KHIREDINE, qu'il veuille bien trouver ici l'expression de nos profondes reconnaissances pour avoir fait partie du jury.

En fin, que toutes les personnes ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce projet, trouvent ici l'expression de nos profonds remerciements.

## **DEDICACE :**

Tout d'abord je tiens à remercier Dieu le tout puissant de m'avoir donné la santé, la patience, la volonté et de m'avoir donné sa bénédiction.

Je dédie ce modeste travail ; A ma très chère maman, qui m'a comblé de son soutien et m'a voué un amour inconditionnel. Tu es pour moi un exemple de courage et de sacrifice continu.

À mon cher père, que Dieu le garde dans son vaste paradis.

A mes très chères sœurs : Rachida, Kahina, Souad, Lamia, Nassima . A mes chers frères : Zahir, Nordine. Aucun mot ne pourra décrire vos dévouements et vos sacrifices.

A ma binôme, A tous mes ami(e)s, En témoignage de l'amitié sincère qui nous a liées et des bons moments passés ensemble. A tous les gens qui ont cru en moi et qui me donnent l'envi d'aller en avant, Je vous remercie tous.

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce Projet soit possible, je vous dis  
merci

*Amira*

## DEDICACE

Tout d'abord je tiens à remercier Dieu le tout puissant de m'avoir donné la santé, la patience, la volonté et de m'avoir donné sa bénédiction.

Je dédie ce modeste travail ; A mon très cher père, qui a toujours répondu présent dans les moments les plus difficiles, son soutien, son encouragement m'ont donné la force de poursuivre mes études.

À ma chère maman, que Dieu la garde dans son vaste paradis.

A mes très chères sœurs : Kahina et Hannane. A mes chers frères : Lyes, Sofiane, Redouane, Abdesallam et Riad. Aucun mot ne pourra décrire vos dévouements et vos sacrifices.

A mes tantes : Fatiha, Karima, Hakima. Merci du fond du cœur pour votre confiance, votre soutien, votre amour, et surtout votre patience.

A ma binôme, A tous mes ami(e)s, En témoignage de l'amitié sincère qui nous a liées et des bons moments passés ensemble. A tous les gens qui ont cru en moi et qui me donnent l'envi d'aller en avant, Je vous remercie tous.

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.

*Cylia*

## Liste des figures

### Chapitre I : Généralités sur les cristaux photoniques.

**Chapitre I :** Généralités sur les cristaux photoniques.

**Figure I.1 :**(a) Bracelet monté d'une opale naturelle quasi-périodiques bille de silice (b) Image au microscope électronique d'une opale naturelle.

**Figure I.2:** Exemples de cristaux photoniques naturels, (a) Agrandissement d'une aile de papillon (b) Plume de paon.

**Figure I.3 :** Représentation des cristaux photoniques 1D, 2D et 3D.

**Figure I.4 :** Représentation schématique d'un miroir de Bragg constitué de 2 types de couches de permittivité  $\epsilon_1$  et  $\epsilon_2$  et la période 'a'.

**Figure I.5 :** Cristaux photoniques bidimensionnels (a) Structure 2D déconnectée.

**Figure I.6:** Structure 2D : (a) Structure carrée, (b) triangulaire et (c) hexagonale.

**Figure I.7 :** Les types de polarisations dans les cristaux photoniques 2D.

**Figure I.8 :** Réseau réel, réciproque, première zone de Brillouin et zone de Brillouin irréductible pour les réseaux 2D (a) hexagonal et (b) carré.

**Figure I.9:** Exemple d'un diagramme de bande.

**Figure I.10:** La première structure BIP 3D :la yablonovite .

**Figure I.11:** Exemples des structures artificiels 3D : Structure cubique(1), tas de bois(2), structure spirale(3), diamant(4).les

**Figure I.12 :** Défauts ponctuels : (a) défauts lacunaires (b) et (c) défauts de substitution.

**Figure I.13 :** Exemples de défauts linéaires dans un cristal photoniques 2D créés par : (a) la modification de la distance entre motifs élémentaires, (b) la modification de l'indice de réfraction, (c) la suppression de motifs élémentaires, (d) la modification de la taille des motifs élémentaires.

**Figure I.14 :** Exemples d'une fibre optique à cristaux photoniques.

**Figure I.15 :** Photographie par microscopie électronique à balayage d'un dispositif typique (biocapteur à base de cavité à CP).

## Chapitre II : Démultiplexeur à base cristaux photoniques

**Figure II.1:** Démultiplexeur 8 canaux.

**Figure II.2 :** cavité de type L3et de type H2.

**Figure II.3 :** Structure schématique du démultiplexeur proposé par la référence [38].

**Figure II.4:** Spectre de transmission pour la structure proposé [38].

**Figure II.5 :**(a)Schéma du démultiplexeur proposé par [39], (b) Réponse en transmission.

**Figure II.6:** Résonateurs en anneaux à cristaux photoniques : (a) un anneau quasi-carré dans un réseau carré, (b) un anneau hexagonal dans un réseau triangulaire, (c) un anneau circulaire dans un quasi-cristal photonique.

**Figure II.7:** Réponse spectrale d'un résonateur en anneau.

**Figure II.8:** Démultiplexeur proposé par Alipour et al.

**Figure II.9:** Spectre de transmission de ce démultiplexeur.

**Figure II.10:** structure schématique du démultiplexeur présenté par Mahmoud et al.

**Figure II.11:** Spectre de la transmission de ce démultiplexeur.

## Chapitre III : Résultats et interprétation

**Figure III.1:** Fenêtre principale du programme RSoftCAD.

**Figure III.2 :** Fenêtre principale de FullWAVE.

**Figure III.3 :** Fenêtre principale de BandSOLVE.

**Figure III.4 :** Structure sans défauts.

**Figure III.5:** Diagramme de bandes de la structure d'étude.

**Figure III.6:**(a) structure schématique du filtre. (b) son spectre de transmission.

**Figure III.7:** Représentation de la distribution du champ électrique pour le filtre pour  $\lambda=1.5519 \mu\text{m}$ .

**Figure III.8:** Représentation schématique du démultiplexeur D=3, L=5.

**Figure III.9 :** Spectre de transmission du démultiplexeur pour D=3 et L=5.

**Figure III.10:** Spectre de transmission du démultiplexeur pour D=5 et L=5

**Figure III.11:** Spectre de transmission du démultiplexeur optimisé pour D=5 et L=4.

**Figure III.12 :** Représentation de la distribution du champ électrique pour le démultiplexeur pour  $\lambda_1=1.5499 \mu\text{m}$  ,  $\lambda_2= 1.5519 \mu\text{m}$  ,  $\lambda_3=1.5538 \mu\text{m}$  ,  $\lambda_4=1.5559 \mu\text{m}$ .

**Figure III.13:** Structure schématique du démultiplexeur proposé pour D=12 et L=5.

**Figure III.14:** Spectre de transmission du démultiplexeur optimisé pour D=12 et L=5.

**Figure III.15:** structure schématique du démultiplexeur optimisé.

**Figure III.16:** Spectre de transmission du démultiplexeur optimisé pour D=10 et L=5.

**Figure III.17:** Représentation de la distribution du champ électrique pour le démultiplexeur pour  $\lambda_1=1.5499 \mu\text{m}$  ,  $\lambda_2= 1.5519 \mu\text{m}$  ,  $\lambda_3=1.5538 \mu\text{m}$  ,  $\lambda_4=1.5559 \mu\text{m}$ .



### Liste des tableaux

**Tableau III.1:** influence de l'indice ( $n$ ) sur la longueur d'onde de sortie du filtre.

**Tableau III.2 :** influence du rayon 'R' sur la longueur d'onde de sortie du filtre.

**Tableau III.3 :** Caractéristiques du démultiplexeur pour  $D=3$  et  $L=5$ .

**Tableau III.4 :** Caractéristiques du démultiplexeur proposé pour différentes valeurs de 'D'.

**Tableau III.5:**Caractéristiques du démultiplexeur proposé pour différentes valeurs de 'L'.

**Tableau III.6:** Caractéristiques du démultiplexeur pour  $D=12$  et  $L=5$ .

**Tableau III.7 :** Caractéristiques du démultiplexeur proposé pour différentes valeurs de 'D'.

**Tableau III.8 :** Caractéristiques du démultiplexeur proposé pour différentes valeurs de 'L'.

## Liste des acronymes :

Dans ce manuscrit nous avons utilisée quelques abréviations dont nous rappelons la signification ci-dessous :

**BIP** : Bande Interdite Photonique.

**ZB** : Zone de Brillouin.

**CP** : cristal photonique.

*f* : Facteur de remplissage.

**Q** : Facteur de qualité

**FDTD**: finite diferrence in the time domain.

**FDTD-2D** : Bi-dimensional Finite Difference Time Domain.

*n* : Indice de réfraction.

**PWE** : plane wave expansion.

*r* : Rayon du cristal photonique.

**TE** : Transverse Electrique.

**TM** : Transverse Magnétique.

$\lambda$ : Longueur d'onde.

**a** : Période du cristal photonique.

$\epsilon$ : Permittivité diélectrique.

**CPh-1D** : unidimensionnel.

**CPh-2D** : bidimensionnel.

**CPh-3D** : tridimensionnel.

**PCRRs** : résonateur en anneau.

**WDM** : démultiplexeur en longueur d'onde.

## Sommaire

<b>Liste des figures.....</b>	<b>i</b>
<b>Liste des tableaux.....</b>	<b>1</b>
<b>Liste des abréviations .....</b>	<b>1</b>

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

### **Chapitre I : Généralités sut les cristaux photonique**

I.1. Introduction :.....	3
I.2. Définition des cristaux photoniques : .....	3
I.3. Types des cristaux photoniques : .....	5
I.3.1. Cristaux photoniques unidimensionnels :.....	5
I.3.2. Cristaux photoniques bidimensionnel :.....	6
I.3.3. Cristaux photoniques tridimensionnels:.....	10
I.4. Défauts dans les cristaux photoniques : .....	11
I.4.1. Les défauts ponctuels :.....	11
I.4.2. Les défauts linéaires :.....	12
I.5. Applications des cristaux photoniques : .....	13
I.5.1. Fibre optique : .....	13
I.5.2. Capteurs à cristaux photoniques: .....	13
I.6. Techniques de modélisation :.....	14
I.6.1. Méthode des ondes planes(PWE) : .....	14
I.6.1. Méthode FDTD :.....	14
I.7. Conclusion :.....	15

### **Chapitre II : Démultiplexeur à base cristaux photoniques**

II.1. Introduction : .....	16
II.2. Définition d'un démultiplexeur : .....	16
II.3. Démultiplexeurs à base de Cristaux photoniques :.....	17
II.3.1.Démultiplexeurs à base de cavités à CPs : .....	18
II.3.2. Démultiplexeur à base des Résonateurs en anneau (PCRR) : .....	21
II.3.2.1. Résonateurs en anneau à cristaux photoniques :.....	21
II.3.2.2. Caractéristiques des résonateurs en anneaux :.....	22
II.4. Couplage des résonateurs avec les guides d'onde :.....	23

II.5. Quelques configurations des démultiplexeurs à base de PCRRs: .....	23
II.5.1. Démultiplexeur à base de résonateurs en anneaux dans un quasi crystal :.....	23
II.5.2. Démultiplexeur à base d'un PCRR en forme de 'X' :.....	24
II.6. Conclusion :.....	25

### **Chapitre III : Résultats et interprétation**

III.1. Introduction : .....	27
III.2. Présentation de l'outil de simulation :.....	27
III.2.1. Simulateur FullWAVE :.....	28
III.2.2. Simulateur BandSOLVE :.....	28
III.3. Structure d'étude : .....	29
III.4. Filtre à base de résonateur en anneau à cristaux photoniques :.....	30
III.4.1. Structure du filtre : .....	30
III.4.2. Etude de l'effet de plusieurs paramètres sur la longueur d'onde de sortie du filtre :.....	32
III.5. Démultiplexeur à base de résonateurs en anneaux à cristaux photoniques :.....	33
III.5.1. Première topologie : .....	33
III.5.2. Deuxième topologie : .....	38
III.6. Conclusion :.....	43
Conclusion Générale .....	44

Références bibliographiques

Résumé

# **Introduction Générale**

## Introduction générale

Ces dernières années, les matériaux à bande interdite photonique (BIP) ou cristaux photoniques ont attiré de nombreux chercheurs en science de la technologie, grâce à leurs propriétés optiques uniques qui ont suscité un intérêt important, offrant la possibilité de contrôler la propagation de la lumière. Le développement de ce nouveau type de matériau a ouvert la voie à un nouveau champ de recherche et à des possibilités d'applications très diverses.

Les cristaux photoniques sont des matériaux naturels ou artificiels dont l'indice de réfraction varie périodiquement dans les différentes directions de l'espace et constituent actuellement une nouvelle classe de matériaux. Ces matériaux peuvent en effet offrir aux photons le même comportement des électrons dans un réseau cristallin. Cette analogie permet d'envisager l'utilisation des cristaux photoniques pour confiner, localiser, filtrer ou bien guider la lumière : on parle alors du contrôle de la longueur d'onde des signaux optiques véhiculés, qui constitue une fonction clé des réseaux de télécommunications optiques.

L'utilisation des cristaux photoniques pour filtrer les ondes électromagnétiques remonte aux années 1919. L'idée de créer des cristaux diélectriques artificiels pour obtenir une permittivité contrôlable dans le domaine des micro-ondes date des années 1950. En 1987[1], John a montré une localisation tridimensionnelle de la lumière, en même temps, Yablonovitch et al. ont proposé d'inhiber l'émission spontanée dans les semi-conducteurs en généralisant le concept des miroirs de Bragg à plusieurs dimensions. En 1991, Genack et al. ont montré expérimentalement l'existence de l'effet de localisation de la lumière dans les structures périodiques. Dans la même année, Yablonovitch et al. ont démontré expérimentalement la possibilité de réaliser une structure diélectrique capable de réfléchir la totalité d'un rayonnement électromagnétique, quelle que soit la direction incidente et dans le domaine des micro-ondes. Depuis, de nombreuses voies de recherches ont été ouvertes. Tous les domaines de longueur d'onde sont concernés, des micro-ondes jusqu'à l'optique [1].

Les applications potentielles des BIP-2D sont variées et multiples : réalisation des guides d'ondes, cavités résonantes de taille très réduite, filtres sélectifs, fibres optiques, démultiplexeurs.

Le démultiplexeur à cristaux photoniques représente un élément fondamental pour les chaînes de télécommunication optique. L'application des cristaux photoniques en tant que démultiplexeur constitue un domaine de recherche très prometteur en raison de leur extrême miniaturisation, leur meilleur confinement de la lumière et leur possibilité d'intégration.

Le présent manuscrit est structuré en trois chapitres répartis comme suit :

Dans le premier chapitre, nous commencerons par les notions générales sur les cristaux photoniques. Après un bref rappel sur le phénomène d'ouverture de bandes interdites et les différents types de cristaux photoniques, nous focaliserons notre étude sur les cristaux bidimensionnels (CPs-2D). Nous continuerons par une présentation des principaux défauts qui existent au niveau des cristaux photoniques. Enfin, Nous terminerons ce chapitre par quelques applications des cristaux photoniques.

Le deuxième chapitre est consacré aux démultiplexeurs à cristaux photoniques, leurs descriptions, leurs principes de fonctionnement et les exemples d'applications les plus récentes dans lesquels sont utilisées différentes configurations des démultiplexeurs à cristaux photoniques.

Dans le dernier chapitre, nous analyserons les caractéristiques des démultiplexeurs à base des résonateurs en anneaux à cristaux photoniques, en utilisant la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD). En analysant ces caractéristiques, nous confirmerons la faisabilité de démultiplexeurs quatre canaux à base de résonateur en anneaux à cristaux photoniques.

Enfin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

# **Chapitre I**

---

**Généralités sur les cristaux  
Photoniques**



### **I.1. Introduction :**

Les cristaux photoniques sont des structures dont l'indice de réfraction varie périodiquement dans une, deux ou trois dimension. La notion des cristaux photonique a été introduite pour la première fois par Yablonovitch en 1987[2]. En passant par les premières études numériques en 1990, les prototypes aux longueurs d'ondes microondes en 1991, puis aux longueurs d'ondes optiques en 1995 jusqu'aux premiers dispositifs commercialisés en 1999.

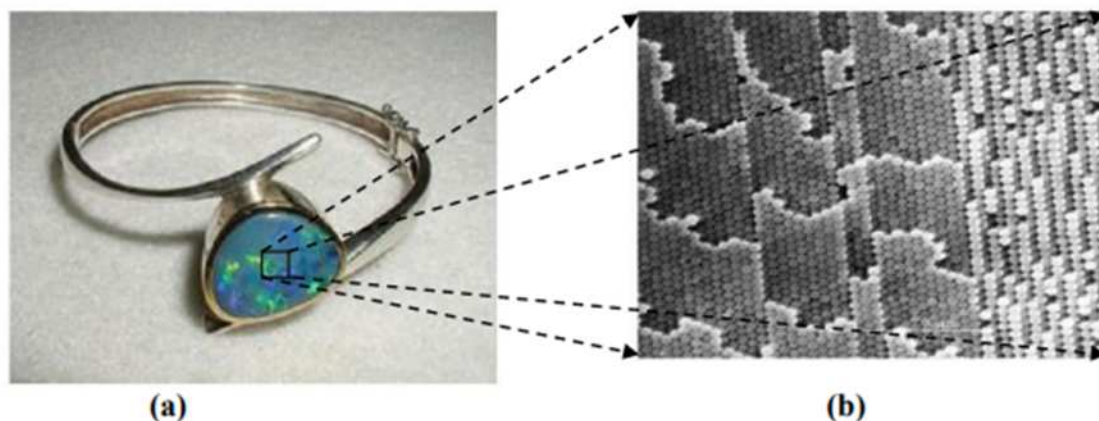
Dans ce premier chapitre nous allons définir les concepts de base liés aux cristaux photoniques et plus particulièrement les cristaux photoniques bidimensionnels, puis nous allons énumérer les types de cristaux photoniques, leurs défauts et leurs applications. Nous terminerons par la présentation de quelques techniques de modélisation des cristaux photoniques.

### **I.2. Définition des cristaux photoniques :**

Les cristaux photoniques sont des matériaux dont la constante diélectrique est modulé de façon périodique. Cette modulation permet de contrôler la propagation des ondes électromagnétiques, dans une ou plusieurs directions avec une période de l'ordre des longueurs d'onde. La propriété principale des cristaux photoniques est l'existence de la bande interdite photonique (BIP), qui correspond à un intervalle de longueurs d'onde dans lequel la propagation de la lumière est interdite dans certaines directions du cristal photonique [3,4].

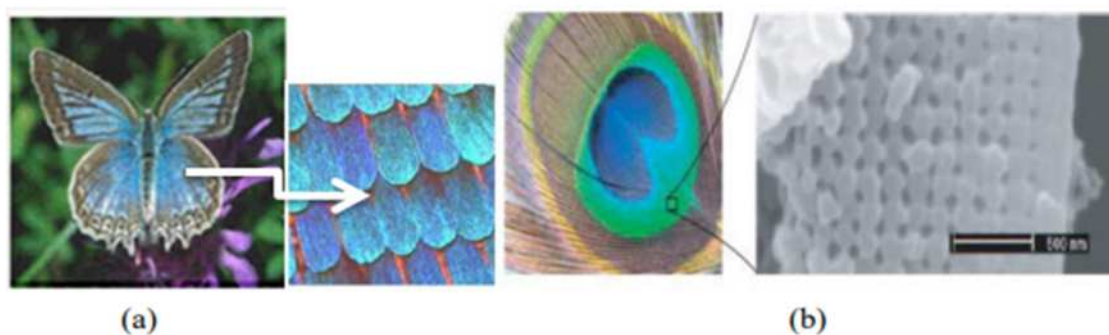
- **Les cristaux photoniques naturels :**

Les cristaux photoniques existent dans la nature à l'état minéral et biologique. On cite par exemple l'opale figure (I.1), qui est une roche constituée de microbilles de silice réparties selon un arrangement régulier dans les trois dimensions de l'espace.



**Figure I.1 :**(a) Bracelet monté d'une opale naturelle quasi-périodiques bille de silice (b) Image au microscope électronique d'une opale naturelle [5].

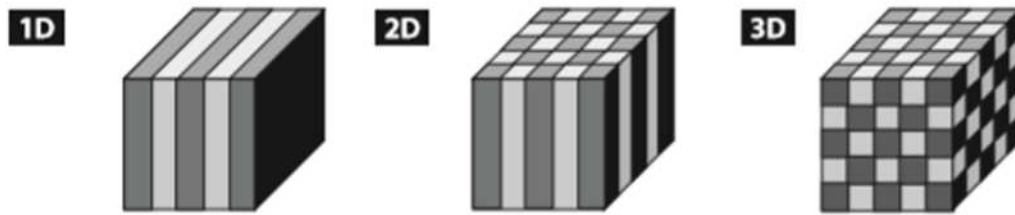
Les cristaux photoniques sont aussi présents à l'état naturel sous plusieurs formes par exemple, Les Papillons sont parmi les insectes les plus colorés que nous offre la nature. Ils sont en fait très largement tributaires de la lumière et ont développé un arsenal impressionnant pour gérer cette interaction avec les ondes électromagnétiques au mieux de leur intérêt. La figure (I.2) montre la structure microscopique de l'aile d'un papillon, cette structure à un comportement identique à celui des structures à bandes interdites photoniques.



**Figure I.2:** Exemples de cristaux photoniques naturels, (a) Agrandissement d'une aile de papillon (b) Plume de paon [5].

### I.3. Types des cristaux photoniques :

Il existe plusieurs types de cristaux photoniques suivant le nombre de directions de périodicité : les cristaux photoniques unidimensionnels (1D), les cristaux photoniques bidimensionnels (2D), et les cristaux photoniques tridimensionnels (3D). La figure (I.3) représente ces types.



**Figure I.3** : Représentation des cristaux photoniques 1D, 2D et 3D [5].

### I.3.1. Cristaux photoniques unidimensionnels :

Le cristal photonique unidimensionnel appelée aussi « Miroir de Bragg » est une structure dans laquelle la constante diélectrique est périodique suivant une seule direction. Cette structure est constituée d'une alternance de couches diélectrique de permittivité différentes  $\varepsilon_1$   $\varepsilon_2$ , comme le montre la figure (I.4). 'a' représente la période de la structure.



**Figure I.4** : Représentation schématique d'un miroir de Bragg constitué de 2 types de couches de permittivité  $\varepsilon_1$  et  $\varepsilon_2$  et la période 'a' [6].

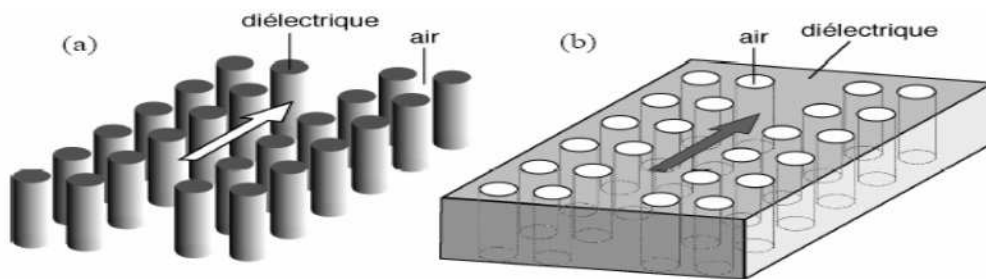
### I.3.2. Cristaux photoniques bidimensionnel :

Un cristal photonique bidimensionnel est une structure présentant une périodicité de l'indice de réfraction dans deux directions de l'espace et homogène dans la troisième. Il existe plusieurs façons de réaliser ces structures bidimensionnelles, par exemple : on peut placer des tiges diélectriques dans l'air ou encore dans un autre diélectrique. On distingue deux types de structures bidimensionnelles:

**Les structures dites « déconnectées »** dans lesquelles les motifs élémentaires sont d'indice  $n_1$  supérieur à l'indice  $n_2$  de l'espace inter motifs. Elles sont composées d'un réseau périodique de piliers de diélectrique dans l'air.

**Les structures dites « connectées »** dans lesquelles les motifs élémentaires sont d'indice  $n_1$  inférieur à l'indice  $n_2$  de la matrice diélectrique. Elles sont composées d'un réseau périodique de trous d'air percés dans un diélectrique.

La figure (I.5) montre les deux structures déconnectée et connectée.



**Figure I.5** : cristaux photoniques bidimensionnels (a) Structure 2D déconnectée  
(b) Structure 2D connectée [7].

Les CP-2D se regroupent principalement suivant trois types de mailles : le réseau carré, le réseau triangulaire et le réseau hexagonal.

**Figure 1.6**: Structure 2D : (a) Structure carrée, (b) triangulaire et (c) hexagonale [8].

Les propriétés optiques des structures bidimensionnelles sont fortement dépendantes de la polarisation de l'onde électromagnétique, On peut séparer le champ électromagnétique en deux polarisations indépendantes : La polarisation Transverse Electrique (TE), lorsque le champ magnétique est parallèle à l'axe des trous (des tiges), ou Transverse Magnétique (TM) lorsque le champ électrique est parallèle à l'axe des trous (des tiges). La figure (I.7) montre les différents types de polarisation.

**Figure I.7:** les types de polarisations dans les cristaux photoniques 2D [9].

- **Diagramme de dispersion :**

Le diagramme de bandes est parmi les outils les plus utilisés pour illustrer les propriétés de propagation d'une onde électromagnétique au sein d'un cristal photonique. Il s'agit en fait d'une représentation de la relation de dispersion, c'est à dire les variations des fréquences permises et interdites dans le réseau réciproque, en fonction de la projection du vecteur d'onde suivant les directions de haute symétrie de la première zone de Brillouin [10].

Nous allons définir dans la section suivante le réseau réciproque et la zone de Brillouin.

- **Réseau réciproque :**

Le réseau réciproque d'un CP 2D est défini par la relation suivante :

$$\vec{a}_i \cdot \vec{b}_j = 2\pi \delta_{ij}$$

Avec  $\vec{a}_i$  les vecteurs de base du réseau direct  $\vec{b}_j$  les vecteurs de base du réseau réciproque  $\delta_{ij}$  le symbole de Kronecker.

➤ **Zone de Brillouin :**

Les zones de Brillouin (ZB) sont des régions qui partitionnent l'espace réciproque associé au cristal. Il en existe une infinité et peuvent être définies à l'aide des plans de Bragg qui sont les plans médiateurs de l'ensemble des vecteurs formés par des combinaisons linéaires des vecteurs du réseau réciproque.

On appelle zone de Brillouin irréductible la plus petite surface qui permet de déduire la relation de dispersion dans tout l'espace réciproque [11].

Dans le cas du réseau carré, la zone de Brillouin est réduite à un triangle dont les sommets sont les points de haute symétrie de l'espace réciproque  $M$ ,  $\Gamma$  et  $X$ . Dans le cas du réseau triangulaire, la zone de Brillouin est réduite à un triangle dont les sommets sont les points de haute symétrie de l'espace réciproque  $M$ ,  $\Gamma$  et  $K$ . Le vecteur d'onde parcourt ainsi les directions de plus haute symétrie :  $X\Gamma$ ,  $M\Gamma$  et  $MX$  pour le réseau carré, et :  $K\Gamma$ ,  $M\Gamma$  et  $MK$  pour un réseau triangulaire.

La figure (I.8) représente l'espace direct et réciproque ainsi que la première zone de Brillouin et la zone de Brillouin irréductible pour un réseau carré et triangulaire. Les points de haute symétrie du réseau réciproque sont également reportés sur la figure (I.8) pour les deux types de réseaux.

**Figure I.8** : Réseau réel, réciproque, première zone de Brillouin et zone de Brillouin irréductible pour les réseaux 2D (a) hexagonal et (b) carré [12].

Nous présentons sur la figure (I.9) l'exemple d'un diagramme de bande calculé pour une matrice bidimensionnelle de trous d'air répartis suivant un réseau triangulaire.

Le diagramme de la figure (I.9) représente :

- En abscisse, le parcours fait par le vecteur d'onde lorsqu'il décrit le contour formé par les points de haute symétrie  $\Gamma$ , M, K de la première zone de Brillouin.
- En ordonnée, les fréquences des modes calculés.

**Figure I.9** : exemple d'un diagramme de bande.

L'un des principaux résultats de la figure (I.9) concerne la différence de comportement entre les polarisations TE et TM. Sur cette figure, une large BIP est observée pour la polarisation TE, par contre, pour la polarisation TM le gap obtenu est réduit. En effet, un gap TE est facilement accessible avec une structure dont la matrice de haut indice est connectée et à l'inverse, une structure dont le matériau de bas indice est connecté (des piliers dans l'air par exemple) est plus favorable à l'ouverture d'un gap TM [13]. Pour le réseau triangulaire, le recouvrement des deux bandes TE et TM donne naissance à une bande interdite complète.

### **I.3.3. Cristaux photoniques tridimensionnels:**

Les cristaux photoniques tridimensionnels sont des structures périodiques suivant les trois dimensions de l'espace. Seuls ces cristaux peuvent permettre d'obtenir une bande interdite complète. E. Yablonovitch fabriquait un cristal photonique 3D en perçant chaque trou dans un bloc de plexiglas selon trois angles azimutaux séparés de  $120^\circ$  comme il est montré dans la figure(I.10)[14]. De nombreuses méthodes de fabrication des cristaux photoniques tridimensionnels ont été proposées. Structure cubique, tas de bois, structure spirale, diamant figure(I.11).



**Figure I.10:** la première structure BIP 3D : La yablonovite [15].

**Figure I.11:** Exemples des structures artificiels 3D : Structure cubique(1), tas de bois(2), structure spirale(3), diamant(4).

#### **I.4. Défauts dans les cristaux photoniques :**

L'introduction de défauts dans la périodicité du cristal permet d'obtenir des fréquences de propagation permises dans la bande interdite photonique, appelées modes de défaut. Ces défauts sont obtenus en brisant localement la périodicité du cristal, autrement dit en créant une imperfection dans la structure périodique. Dans le cas des cristaux photoniques 2D, on peut créer deux types de défauts : les défauts ponctuels et les défauts linéaires.

##### **I.4.1. Les défauts ponctuels :**

Les défauts ponctuels sont créés en modifiant les caractéristiques d'une cellule du réseau figure (I.12).ils s'effectuent, soit, par une modification locale de la constante diélectrique ou un changement de taille d'un motif du cristal (défaut de substitution), soit par le déplacement d'un de ces motifs ou encore par le retrait d'un motif (défaut lacunaire) [16].

(a) (b) (c)

**Figure I.12:** les défauts ponctuels : (a) défauts lacunaires (b) et (c) défauts de substitution.

#### **I.4.2. Les défauts linéaires :**

Les défauts linéaires appelés aussi défauts étendus, sont créés en retirant (ou en modifiant) une ou plusieurs rangées de motifs du cristal photonique. L'introduction de ce type de défaut permet de guider la lumière selon une direction choisie. La figure (**I.13**) représente les différents défauts étendus.

**Figure I.13:** Exemples de défauts linéaires dans un cristal photoniques 2D créés par : (a) la modification de la distance entre motifs élémentaires, (b) la modification de l'indice de réfraction, (c) la suppression de motifs élémentaires, (d) la modification de la taille des motifs élémentaires.

#### **I.5. Applications des cristaux photoniques :**

Les applications des cristaux photoniques sont multiples et touchent de nombreux domaines. La plupart de ces applications sont en domaine optique, informatique, microonde et

télécommunications. Dans la suite, nous allons décrire quelques exemples d'applications principales des cristaux photoniques tels que : fibre optique et capteurs.

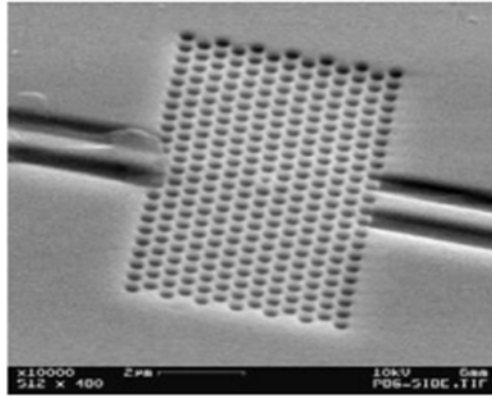
### **I.5.1. Fibre optique :**

La fibre à trous, ou fibre à cristal photonique (FCP) a été proposée pour la première fois en 1995 [17]. Cette fibre est constituée d'un cœur de silice pure entouré d'un arrangement régulier de canaux d'air de dimensions microscopiques comme il est montré sur la figure(I.14). Son principe de fonctionnement est basé sur la présence de la bande interdite photonique qui confine l'énergie au centre de la fibre, en la guidant et en l'empêchant de se propager vers la gaine.

**Figure I.14 :** Exemples d'une fibre optique à cristaux photoniques [18].

### **I.5.2. Capteurs à cristaux photoniques:**

L'application des cristaux photoniques en tant que capteurs constitue un domaine de recherche très prometteur. En raison de leur micro-structuration périodique, ils permettent de piéger les photons et de créer des résonances optiques très sensibles à la présence des molécules à détecter. Les cristaux photoniques disposent d'un large éventail de détection, les rendant applicables dans une large gamme de mesures s'étendant de l'air jusqu'aux fluides très visqueux (plasma). Il existe actuellement plusieurs capteurs optiques comme les capteurs de pression [19], de température [20] et des biocapteurs (figure (I.15)).



**Figure I.15** : Photographie par microscopie électronique à balayage d'un dispositif typique (biocapteur à base de cavité à CP).

### **I.6. Techniques de modélisation :**

Les principales techniques utilisées pour la modélisation des cristaux photoniques sont la décomposition en ondes planes (plane wave expansion, PWE), la méthode des différences finies dans le domaine temporel (Finite-Difference Time-Domain, FDTD).

#### **I.6.1. Méthode des ondes planes(PWE) :**

La méthode de décomposition en ondes planes s'est imposée comme l'un des outils de modélisation privilégiés des cristaux photoniques. Elle est essentiellement utilisée pour analyser les propriétés dispersives des matériaux à bandes interdites photoniques. Cette méthode est très efficace pour calculer les diagrammes de bandes de cristaux photoniques parfaitement périodiques [21], et permet de déterminer la fréquence, la polarisation, la symétrie et la distribution du champ pour les modes d'une structure photonique. Elle consiste à décomposer le champ électromagnétique sur une base d'ondes planes et de transformer la résolution dans le domaine fréquentiel des équations de Maxwell en un problème classique de diagonalisation de matrice [22].

#### **I.6.1. Méthode FDTD :**

La méthode des différences finies dans le domaine temporel, abrégée comme FDTD, La FDTD est une méthode de résolution directe des équations de Maxwell dans le domaine temporel, elle utilise l'outil numérique des différences finies. L'avantage de cette méthode est qu'il est possible de résoudre le champ électromagnétique pour des structures avec des formes arbitraires, la rendant appropriée aux structures nouvelles qui incluent n'importe quel genre de défaut. En outre, il est possible d'obtenir la valeur du champ électromagnétique en chaque

position de la structure. Cependant, en raison du nombre élevé de calculs et l'exigence vis-à-vis la capacité de la mémoire, cette méthode a besoin d'un ordinateur puissant pour exécuter les simulations [23].

### **I.7. Conclusion :**

À l'issue de ce premier chapitre, nous avons présenté les concepts de base sur les Cristaux photonique. Nous avons également introduit les caractéristiques des cristaux photoniques unidimensionnels 1D, bidimensionnels 2D et tridimensionnels 3D. Nous avons abordé Les principes de défauts qui existent aux niveaux des CPs-2D. Nous avons terminé ce chapitre par quelques techniques de modélisation de CPs à savoir la méthode des ondes planes(PWE) et la méthode des différences finies dans le domaine temporel FDTD.

# **Chapitre III**

---

## **Résultats et interprétation**

### II.1. Introduction :

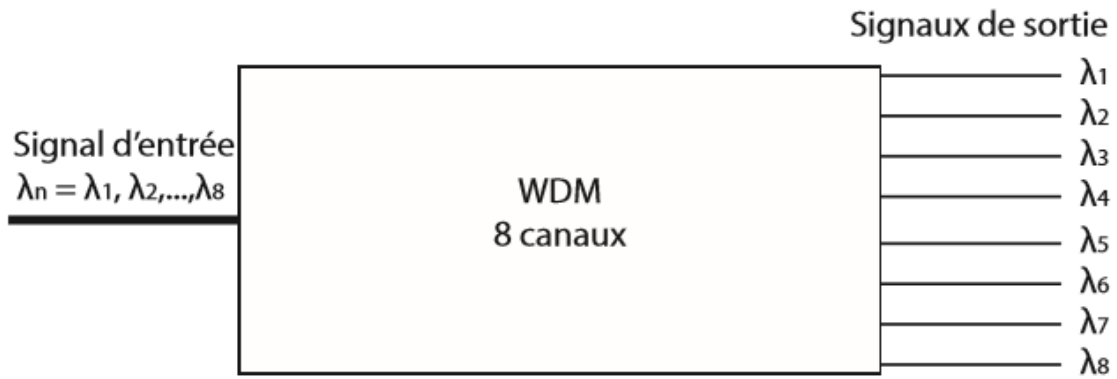
Les cristaux photoniques (CP) sont récemment devenus des candidats favorables pour la conception de dispositifs tout optiques .Actuellement, ils permettent de réaliser un grand nombre de composants tels que diviseurs de puissance, guides d'onde, filtres, démultiplexeurs [24,25].... L'utilisation de ces structures ouvre une voie vers une miniaturisation des composants d'optique intégrée et une amélioration de leurs performances.

Ce chapitre donne un aperçu sur les démultiplexeurs à base de résonateurs en anneaux à cristaux photoniques bidimensionnels .Pour ce faire, nous commençons par la description des résonateurs en anneau à cristaux photoniques et de leurs caractéristiques. Nous expliquons ensuite le mécanisme de couplage des résonateurs avec les guides d'onde. La dernière partie de ce chapitre est consacrée à la présentation de quelques configurations des démultiplexeurs à base de résonateurs en anneaux.

### II.2. Définition d'un démultiplexeur :

Le démultiplexage en longueur d'onde consiste à séparer plusieurs canaux multiplexés en longueur d'onde. Le démultiplexeur est considéré comme un dispositif clé de l'optique intégrée pour transmettre plusieurs signaux de longueurs d'onde différentes en même temps. Avec cette technologie nous obtenons de très haut débit de transmission d'information [26].

Considérons un signal optique comprenant les longueurs d'onde  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i$ . Il est possible de diviser celui-ci en une série de « n » signaux de sortie (avec  $n = 1, 2, \dots, i$ ) de telle sorte que la sortie « n » permette d'extraire la longueur d'onde  $\lambda_n$ . La figure (II.1) illustre ce principe avec un exemple de démultiplexeur à 8 canaux de sortie.



**Figure II.1:** Démultiplexeur 8 canaux [27].

La performance d'un démultiplexeur est évaluée quantitativement en mesurant sa diaphonie(ou Crosstalk, CT), qui est définie comme étant le rapport de la puissance au port de sortie souhaitée pour une longueur d'onde spécifique à la puissance à un port indésirable [28]. Elle est donnée par :

$$CT = 10 \log \frac{\text{Transmission pour une longueur d'onde spécifique au port de sortie non souhaité}}{\text{Transmission pour une longueur d'onde spécifique au port de sortie souhaité}}$$

Selon cette définition, une faible diaphonie signifie une meilleure performance.

### II.3. Démultiplexeurs à base de Cristaux photoniques :

Pour réaliser des dispositifs optiques ultra-compacts, il est primordial d'utiliser des structures capables de contrôler la propagation des ondes lumineuses dans des espaces très restreints. En raison de leur bande interdite photonique (BIP), et de leur capacité à confiner et à contrôler la lumière à une échelle sub-micronique, les cristaux photoniques (CPs) sont considérés comme des structures très prometteuses pour concevoir des dispositifs optiques compacts tels que démultiplexeurs [29,30].

Le démultiplexeur classique peut être réalisé par le biais de filtres sélectifs en longueur d'onde, de réseaux de diffractions, de coupleurs guide à guide...Cependant, ces dispositifs demeurent d'une taille relativement importante : plusieurs millimètres ou centimètres. Notre approche est de chercher à réduire la taille de ces composants en les remplaçant par des dispositifs à cristaux photoniques [31].



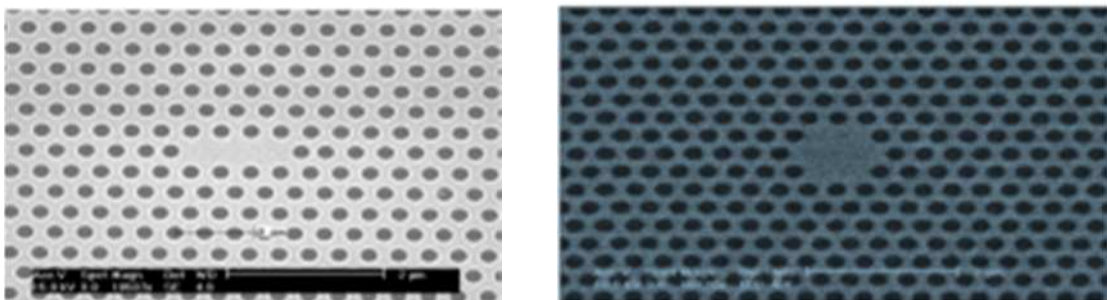
En raison de l'importance des démultiplexeurs optiques, de nombreux travaux ont récemment été consacrés à la conception de démultiplexeurs à base de CPs. Les mécanismes les plus utilisés pour la conception de démultiplexeurs à base de CPs sont : couplage de guides d'ondes à cristaux photoniques [32], filtres channel drop en cascade [33], cavités à cristaux photoniques [34], et les résonateurs en anneaux à cristaux photoniques (PCRRs) [35].

### II.3.1. Démultiplexeurs à base de cavités à CPs :

A base de cavités résonnantes à cristaux photoniques, nous pouvons envisager un nombre important de dispositifs optiques sur une seule structure. Ces dispositifs jouent un rôle important dans les systèmes de communication optiques et offrent les avantages suivants : compacité, performances plus élevées, réduction des pertes [36].

On peut réaliser une cavité en modifiant les paramètres d'un ou plusieurs motifs dans un cristal photonique : soit en changeant le rayon des motifs, soit en les déplaçant de leurs positions originales, soit en remplissant complètement les motifs. Ces cavités sont généralement divisées en deux types : le type  $H_n$  et le type  $L_n$ . La cavité de type  $H_n$  est une cavité hexagonale dont chaque côté présente une omission de 'n' motifs. La cavité de type  $L_n$  est une cavité linéique réalisée par l'omission de 'n' motifs dans la direction horizontale.

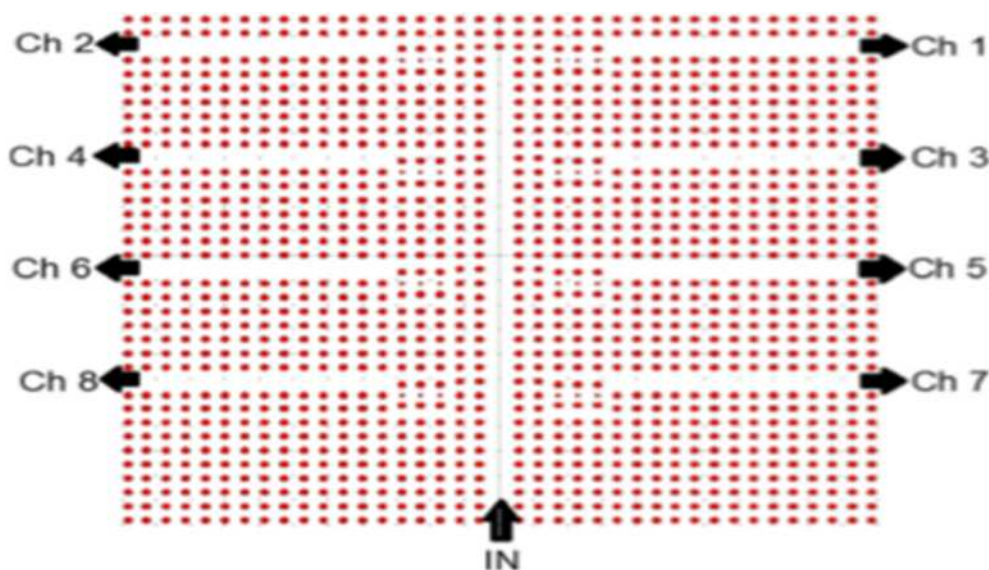
La Figure (II.2) montre des exemples de ces deux types de cavités, une cavité  $H_2$  et une cavité  $L_3$ .



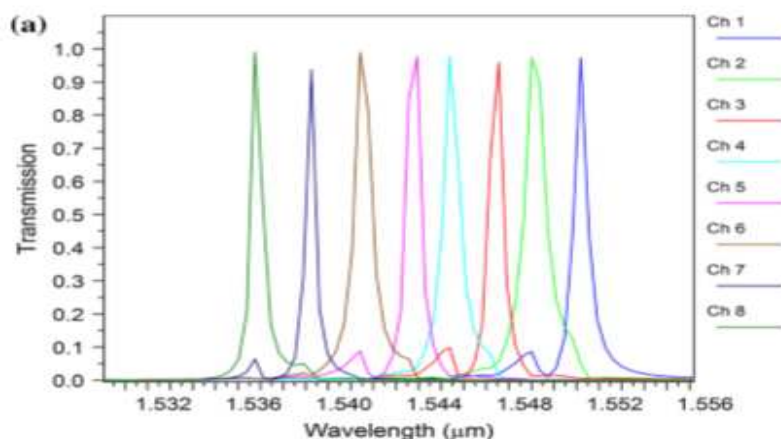
**Figure II.2:** cavité de type  $L_3$  et de type  $H_2$  [37].

En se basant sur ces deux types de cavités, plusieurs configurations de démultiplexeurs à base de cavités résonnantes ont été proposées dans la littérature. Par exemple, les auteurs de

la référence [38] ont conçu une nouvelle structure d'un démultiplexeur huit canaux, basé sur des cavités linéiques créées par la diminution du rayon de trois motifs, comme le montre la figure (II.3). Les longueurs d'onde de sortie pour chaque canal sont sélectionnées en choisissant différents rayons pour ces motifs. Les résultats de leurs simulations sont reportés sur la figure (II.4). Ces résultats montrent que les efficacités de transmission obtenues sont comprises entre 94% et 99%.



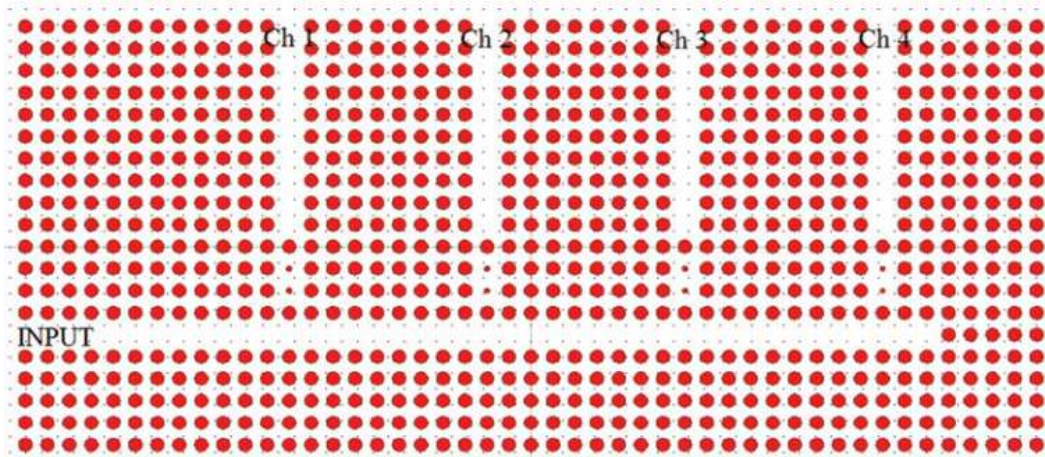
**Figure II.3 :** Structure schématique du démultiplexeur proposé par la référence [38].



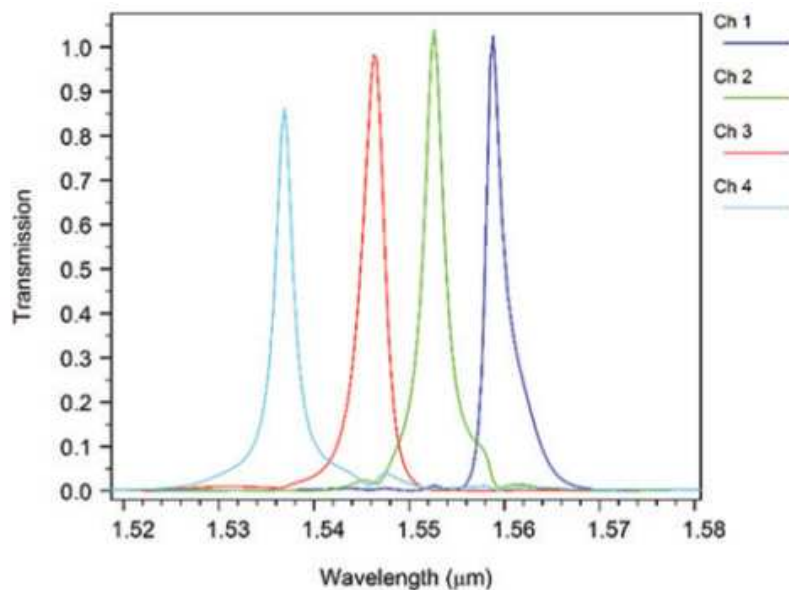
**Figure II.4:** Spectre de transmission pour la structure proposé [38].

Absalan [39] a développé un démultiplexeur quatre canaux. Sa structure schématique est montrée sur la figure (III.5). Ce démultiplexeur comporte un guide d'onde d'entrée et quatre cavités résonantes. Les différentes cavités sont créées en choisissant différents rayons pour les défauts de dimensions réduites, d'où quatre longueurs d'onde différentes. D'après les résultats

de simulation, l'auteur a démontré l'efficacité de sa structure en séparant les quatre longueurs d'onde  $\lambda_1=1,537 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_2=1,546 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_3=1,553 \mu\text{m}$  and  $\lambda_4=1,560 \mu\text{m}$  avec des efficacités de transmission supérieures à 85 % et des niveaux de diaphonie compris entre -18 dB et -3 dB.



(a)



**Figure III.5:**(a)Schéma du démultiplexeur proposé par [39], (b) Réponse en transmission.

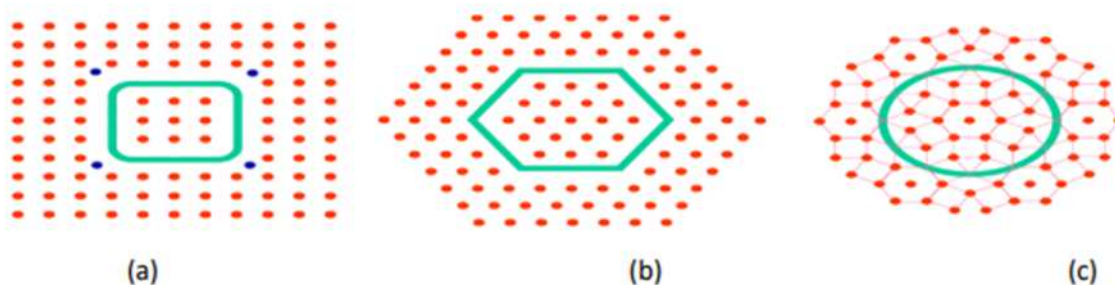
### II.3.2. Démultiplexeur à base des Résonateurs en anneaux (PCRRs) :

On trouvera, dans la littérature, la description de plusieurs types de démultiplexeur à base de résonateurs en anneaux à cristaux photoniques. Le principe consiste en général à extraire une longueur d'onde spécifique d'un train d'ondes circulant dans un guide d'onde, et à la transférer vers un autre guide via un résonateur en anneau à cristal photonique.

### II.3.1. Résonateurs en anneau à cristaux photoniques :

Dans les résonateurs en anneaux à cristaux photoniques (photonic crystals ring resonators, PCRRs), sur lesquels porte plus particulièrement ce travail, la lumière est confinée par effet de bande interdite photonique. Les PCRRs sont obtenus par la suppression de quelques motifs du cristal photonique suivant une forme annulaire [39]. Un mode circulant dans l'anneau est excité par une onde qui se propage dans le guide d'onde voisin.

Contrairement aux résonateurs en anneaux conventionnels, à l'intérieur desquels la lumière est confinée par réflexion totale interne, les résonateurs en anneau à cristaux photoniques offrent une sélectivité spectrale élevée et peuvent répondre aux exigences micrométriques actuelles, puisque le confinement de la lumière est assuré par la bande interdite photonique la figure (II.6) montre quelques exemples de PCRR: un anneau quasi-carré dans un réseau carré, un anneau hexagonal dans un réseau triangulaire, et un anneau circulaire dans un quasi-cristal photonique.



**Figure II.6:** Résonateurs en anneaux à cristaux photoniques : (a) un anneau quasi-carré dans un réseau carré, (b) un anneau hexagonal dans un réseau triangulaire, (c) un anneau circulaire dans un quasi-cristal photonique [40].

#### II.3.1.1. Caractéristiques des résonateurs en anneaux :

Dans cette partie, nous allons définir deux caractéristiques importantes des résonateurs : le facteur de qualité ( $Q$ ) et la finesse ( $F$ ).

##### ➤ Facteur de qualité :

Le facteur de qualité ( $Q$ ) est une grandeur utilisée pour exprimer le confinement temporel de l'énergie dans un résonateur. Il est proportionnel à la durée de vie d'un photon à l'intérieur du résonateur et peut être défini en fonction de celle-ci par la relation [41] :

$$Q = \omega_r \tau \quad (\text{II. 1})$$

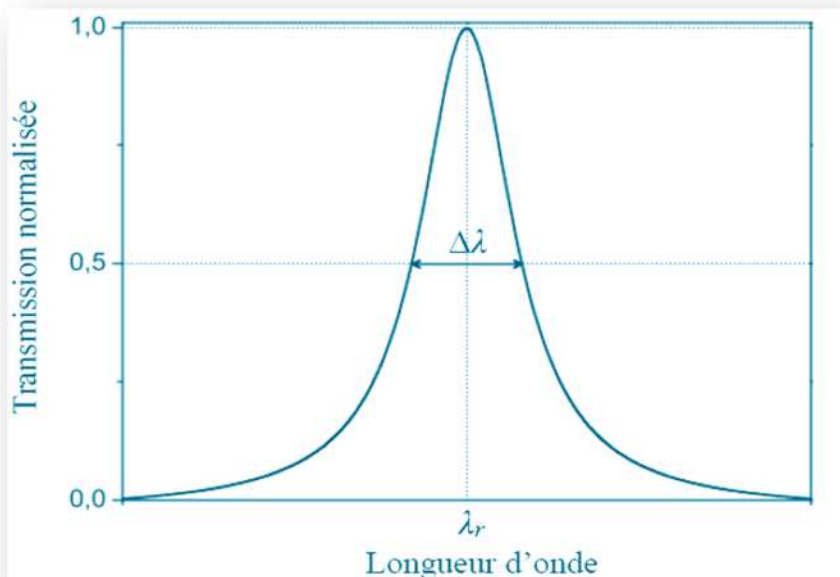


Avec  $\omega_r$  : la pulsation.

Une autre manière de quantifier le facteur de qualité en terme spectral est de faire le rapport entre la longueur d'onde centrale  $\lambda_r$  de résonance et de sa largeur à mi-hauteur  $\Delta\lambda$  (full width at half maximum, FWHM). Cette formulation du facteur de qualité en longueurs d'onde est possible grâce à la forme lorentzienne de la résonance tel que représenté sur la figure (II.7). Il s'exprime comme [41] :

$$Q = \frac{\lambda_r}{\Delta\lambda} \quad (\text{II. 2})$$

Le facteur de qualité est inversement proportionnel au FWHM, ce qui implique qu'une résonance étroite dans le domaine fréquentiel correspond à un résonateur à faibles pertes.



**Figure II.7:** Réponse spectrale d'un résonateur en anneau.

➤ **Finesse :**

On définit la finesse d'un résonateur comme le rapport entre l'intervalle spectral libre (ISL) et la largeur à mi-hauteur ( $\Delta\omega$ ) d'une résonance [42]:

$$F = \frac{ISL}{\Delta\omega} \quad (\text{II. 3})$$

La finesse est d'autant plus grande que les pics sont étroits. Une finesse élevée est un atout important pour ce type de résonateurs, ce qui fait d'eux de bons candidats pour plusieurs applications telles que le filtrage, le démultiplexage et la détection.

### II.4. Couplage des résonateurs avec les guides d'onde :

L'une des problématiques les plus importantes est celle de coupler les résonateurs avec des guides d'onde. En effet, le guide d'onde est l'élément fondamental permettant l'entrée et la sortie du signal pour le résonateur, il est donc indispensable pour ce composant. Lorsque la lumière avec une longueur d'onde appropriée est injectée à l'entrée d'un guide d'onde, couplé latéralement à un ou plusieurs PCRRs, elle sera transmise au résonateur par couplage évanescent. Grâce aux multiples rotations effectuées et aux phénomènes d'interférences constructives, l'intensité s'accroît pour des longueurs d'onde spécifiques et la résonance se produit. A la résonance, une intensité très élevée existe ainsi dans l'anneau. Ces intensités sont évanescentes et décroissent exponentiellement hors de l'anneau [43]. Comme seules quelques longueurs d'onde résonnent à l'intérieur de l'anneau, la structure fonctionne en quelque sorte comme un filtre sélectif en longueur d'onde.

### II.5. Quelques configurations des démultiplexeurs à base de PCRRs:

#### II.5.1. Démultiplexeur à base de résonateurs en anneaux dans un quasi crystal :

En 2016, Alipour et al. [44] ont proposé un démultiplexeur quatre canaux à base de résonateurs en anneaux à quasi-crystal (voir figure (II.8)). La sélection de la longueur d'onde pour chaque canal se fait par la variation de la structure interne des résonateurs. En utilisant quatre résonateurs en anneaux avec des rayons différents des tiges intérieures, ils ont démontré que leur structure est capable de séparer quatre longueurs d'onde différentes. Les résultats des simulations montrés sur la figure(II.9), montrent que les efficacités de transmission calculées pour les quatre canaux sont supérieures à 92%.

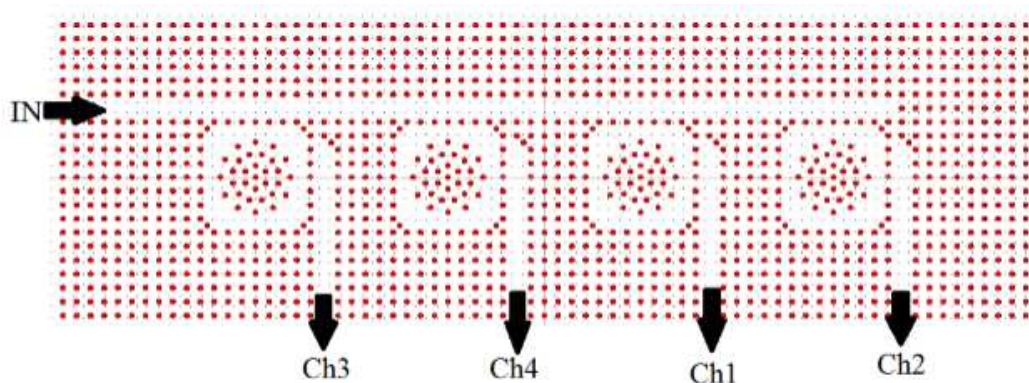
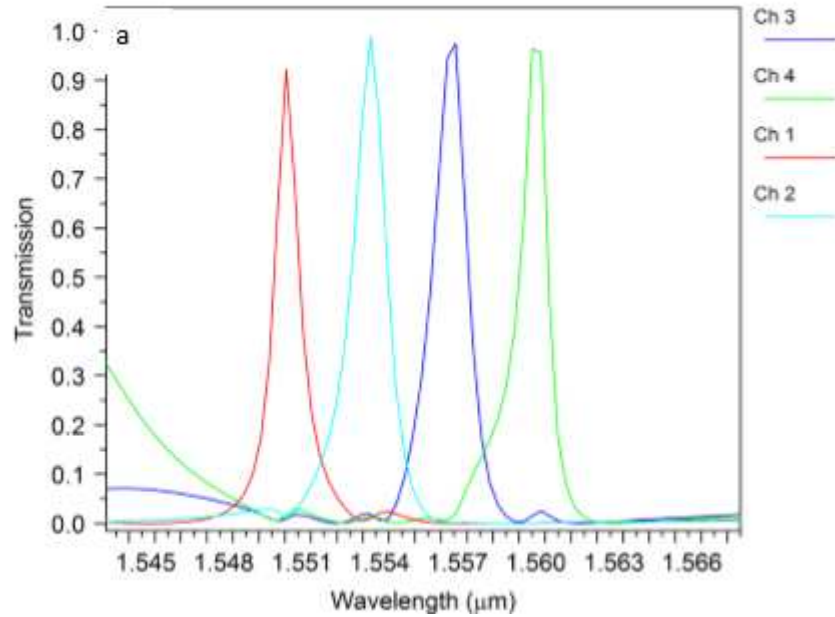


Figure II.8: Démultiplexeur proposé par Alipour et al.



**Figure II.9:** Spectre de transmission de ce démultiplexeur.

### II.5.2. Démultiplexeur à base d'un PCRR en forme de 'X' :

La figure (II.10) représente la structure schématique du démultiplexeur trois canaux proposé par Mahmoud et al. [45]. Leur composant est constitué de trois régions d'indice de réfraction différent, d'où trois longueurs d'onde différentes. Chaque région contient un PCRR en forme de 'X'. Les résultats de leurs simulations, illustrés sur la figure (II.11), ont montré que le démultiplexeur proposé est capable de séparer les longueurs d'onde 1529.97 nm, 1549.81 nm et 1569.96, avec des efficacités de transmission proche de 100 % pour les trois canaux.

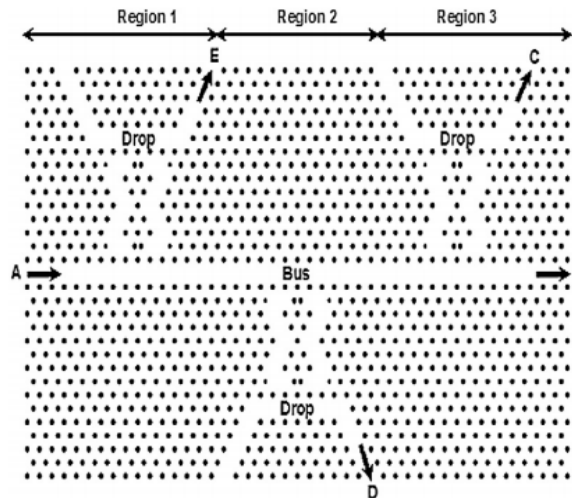


Figure II.10 : Structure schématique du démultiplexeur présenté par [45].

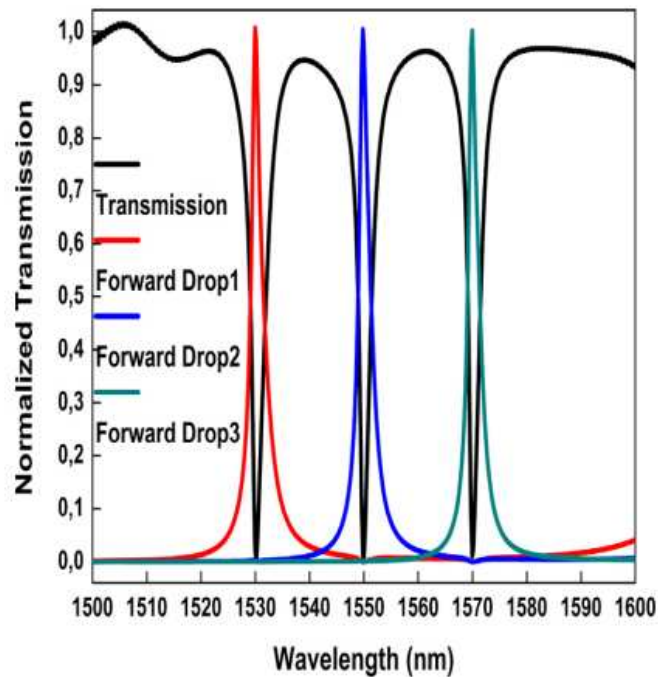


Figure II.11: Spectre de la transmission de ce démultiplexeur [45].

## II.6. Conclusion :

Parmi toutes les applications possibles à base des cristaux photoniques, nous nous sommes intéressés dans ce chapitre à la fonction de démultiplexage en longueurs d'onde. De manière à introduire le sujet, nous avons commencé par la définition des démultiplexeurs,



suivi par la présentation de différentes configurations à base de résonateurs à cristaux photoniques, en particuliers les résonateurs en anneaux à cristaux photoniques.

# **Chapitre III**

---

## **Résultats et interprétation**

### III.1. Introduction :

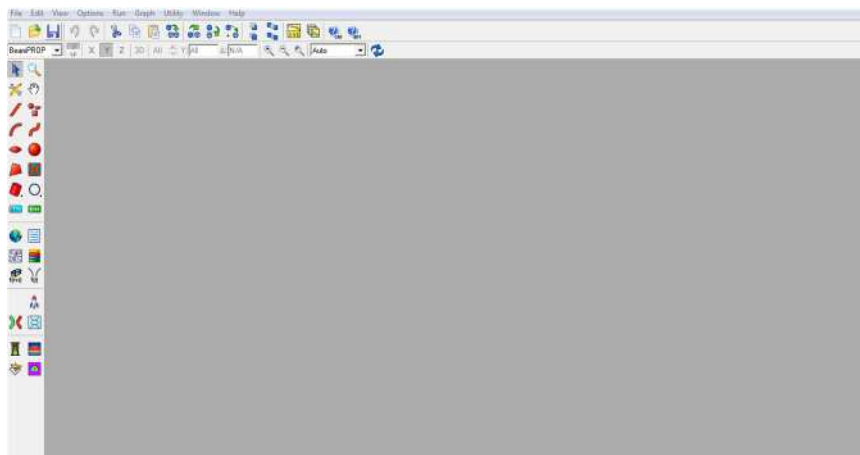
La modélisation électromagnétique des propriétés des cristaux photoniques nécessite en général un gros investissement en programmation et en analyse numérique, et constitue une activité exigeante en compétence et en temps. Le développement des méthodes de modélisation optiques précises et rapides reste donc primordial pour l'étude de ces structures. De plus plusieurs simulateurs ont été conçus pour faciliter cette tâche, parmi eux se trouve le simulateur Fullwave qui sera largement utilisé dans les simulations réalisées dans ce travail.

Dans ce mémoire, Nous nous sommes inspirés des travaux de Fallahi et al. [46]. Afin de concevoir différentes topologies de démultiplexeurs quatre canaux, basés sur des résonateurs en anneaux à cristaux photoniques.

### III.2. Présentation de l'outil de simulation :

Le Rsoft CAD est un programme de base de RSoft photonique. Dans RSoft, il existe plusieurs modules intégrés, chaque module assure une fonction bien précise, parmi ces modules on trouve : BeamPROP, FullWAVE, BandSOLVE, GratingMOD et Diffract MOD.

La fenêtre du programme RsoftCAD comporte une barre de menus située en haut de la fenêtre, une barre d'outils qui comporte plusieurs icônes, et la barre d'état, comme montre la figure(III.1).



**Figure III.1:** Fenêtre principale du programme RSoftCAD.

### III.2.1. Simulateur FullWAVE :

Le moteur de simulation FullWAVE est une partie de Rsoft photonique. Son objectif est de fournir un ensemble de simulations pour étudier la propagation de la lumière dans les structures à base des cristaux photoniques. La simulation est basée sur la méthode des différences finies dans le domaine temporel. Cette méthode est un outil puissant pour la résolution des équations de Maxwell. Réalisée dans le domaine temporel, elle permet d'appréhender visuellement la propagation d'une onde électromagnétique dans un milieu structuré (notamment un cristal photonique). On peut obtenir les réponses en champs TE et TM simultanément, ainsi que les cartographies du champ électromagnétique. La figure(III.2) ci-dessous montre la fenêtre principale de Fullwave.

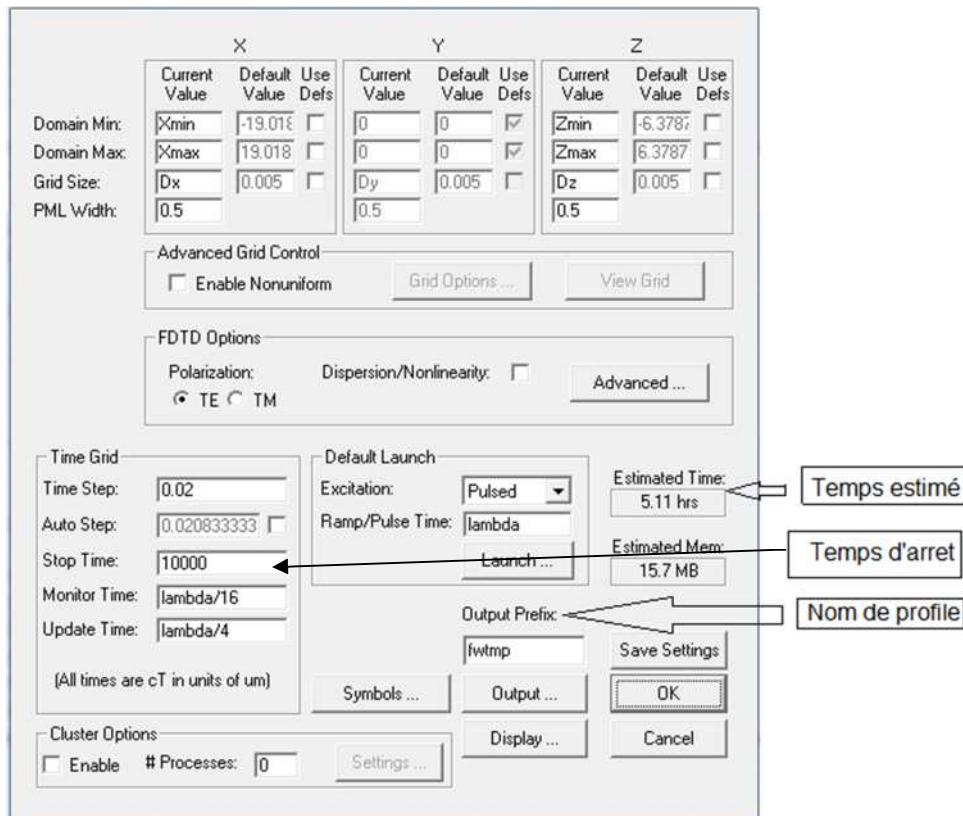


Figure III.2 : Fenêtre principale de FullWAVE.

### III.2.2. Simulateur BandsOLVE :

BandsOLVE est un moteur de simulation utilisé pour la génération et l'analyse des structures à bandes interdites photoniques. Ce module de simulation utilise la méthode des ondes planes optimisée pour les structures périodiques idéales, afin de produire les

diagrammes de dispersion. La figure (III.3) ci-dessous illustre la fenêtre principale de Bandsolve.

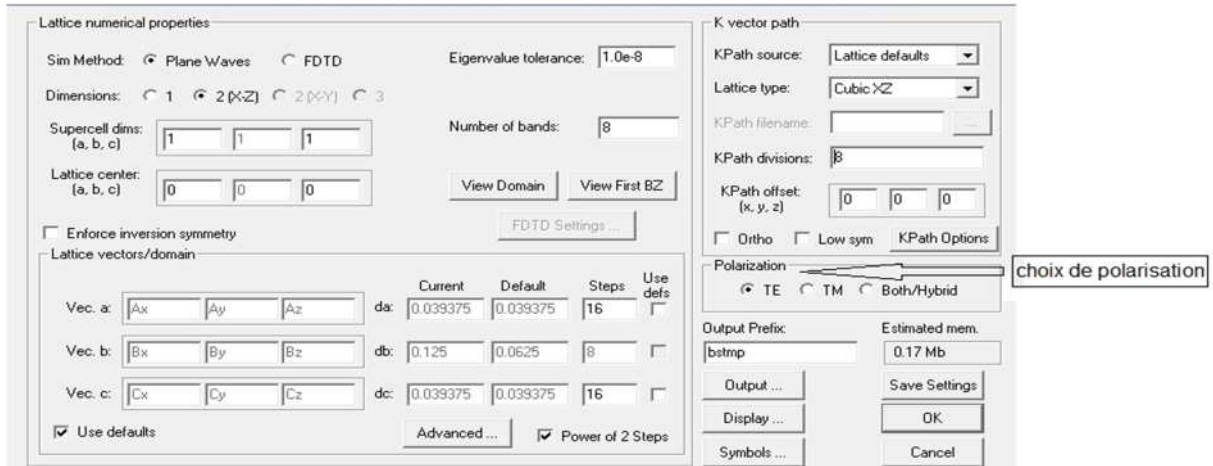


Figure III.3 : Fenêtre principale de BandSOLVE.

### III.3. Structure d'étude :

La structure proposée est conçue en utilisant un cristal photonique bidimensionnel formé par des piliers d'indice de réfraction  $n=3.9$  plongés dans l'air d'indice de réfraction égal à 1. Ces piliers ont une section circulaire réparties selon un réseau carré de période  $a=0.608 \mu\text{m}$  ( $a$  est la distance entre le centre de deux motifs adjacents) et de rayon  $r=0.106 \mu\text{m}$ . Le nombre de tiges dans les directions X et Z est de 23 et 21, respectivement. Le schéma de la structure est reporté sur la figure (III.4).

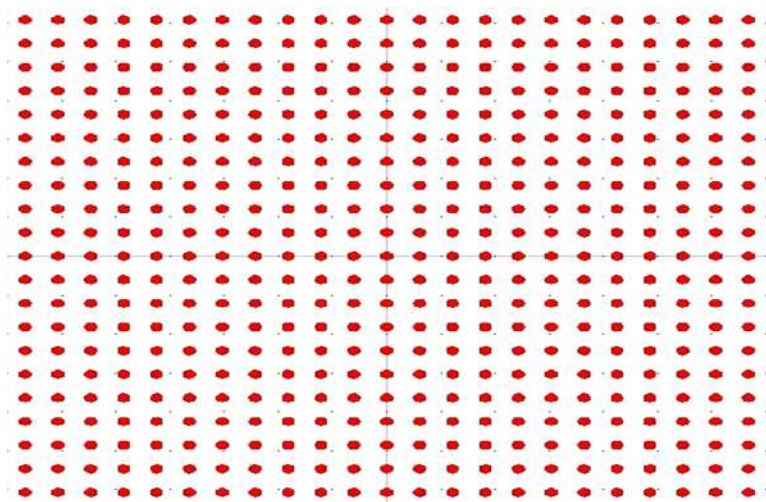


Figure III.4 : Structure sans défauts.

Le diagramme de dispersion du cristal photonique sans défaut est calculé en utilisant le simulateur BandSolve basé sur la méthode des ondes planes. En fonction de ce calcul, nous pouvons déterminer les bandes interdites photoniques (BIPs) du cristal considéré. La figure (III.5) montre que la structure possède deux bandes interdites photoniques pour les deux polarisations TE et TM. Selon cette figure le plus grand gap photonique est en polarisation TM et situé entre  $0.325 < a/\lambda < 0.449$  correspondant aux longueurs d'onde  $1.354\mu\text{m} < \lambda < 1.870 \mu\text{m}$ .

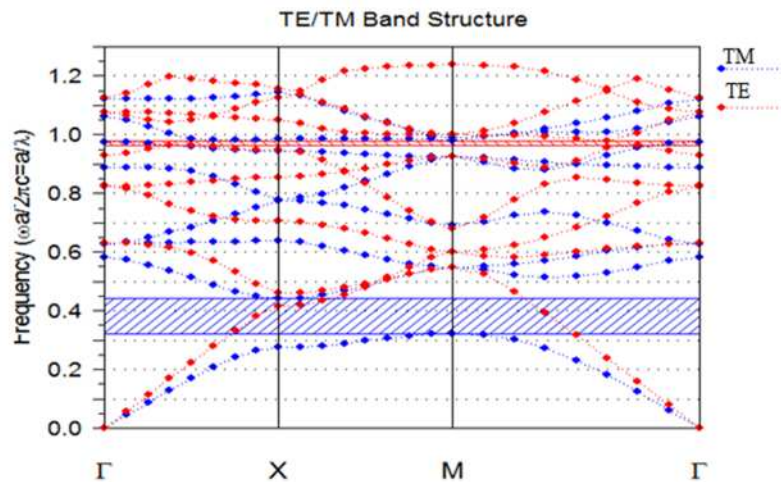


Figure III.5: Diagramme de bandes de la structure d'étude.

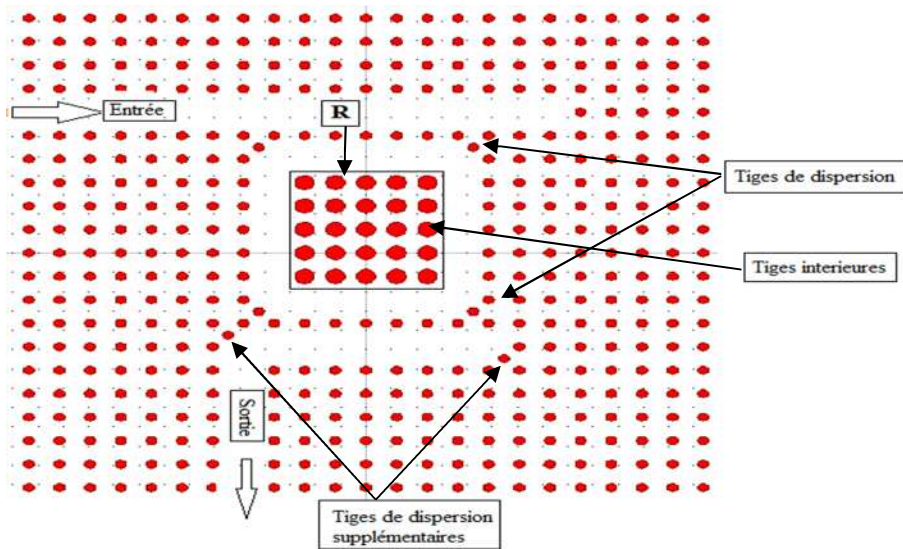
### III.4. Filtre à base de résonateur en anneau à cristaux photoniques :

#### III.4.1. Structure du filtre :

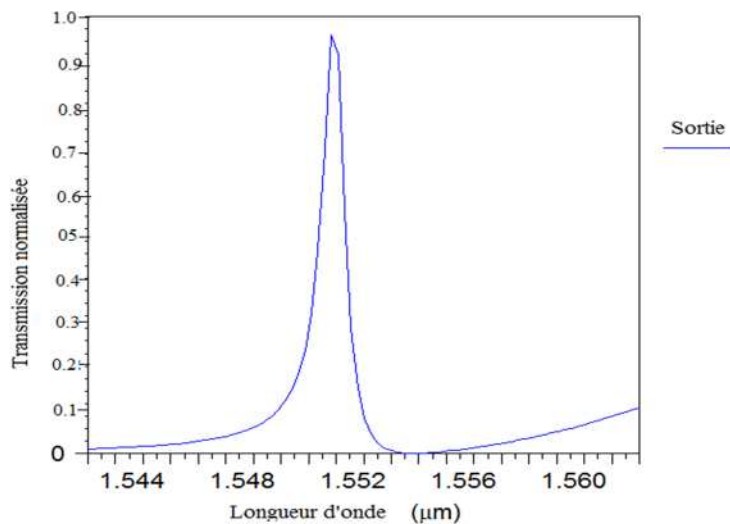
Dans ce travail, nous allons étudier un démultiplexeur en longueur d'onde à base de résonateur en anneaux à cristaux photonique. Mais avant d'entamer cette étude, nous allons d'abord nous intéresser à l'élément fondamental qui constitue le démultiplexeur : le filtre. La figure(III.6.a) représente la structure schématique de ce filtre. Il contient deux guides d'ondes (guide d'entrée et guide de sortie), entre lesquels est disposé un résonateur en anneau de forme carrée. Les deux guides d'onde sont créés par la suppression de quelques tiges de la structure sans défauts. Les tiges situées à l'intérieur du PCRR sont appelées tiges intérieures, leurs rayon est égale à  $R=0.188 \mu\text{m}$ . Tandis que les tiges de couplage sont celles placées entre le PCRR et les guides d'onde.

Afin d'améliorer les caractéristiques du filtre, quatre tiges appelées tiges de dispersion sont placées dans les quatre coins du résonateur. Elles sont identiques aux autres tiges de la

structure. L'introduction de ces tiges élimine les modes de contre-propagation dus aux courbures du résonateur, en choisissant judicieusement leurs paramètres (le rayon et la position), d'où une amélioration des caractéristiques du filtre. Deux autres tiges de dispersion supplémentaire sont placées avec une constante de demi-réseau dans le guide d'onde de sortie. Ces tiges ont exactement le même rayon et le même indice de réfraction que toutes les autres tiges de la structure photonique [47,48 ,49].



(a)



(b)

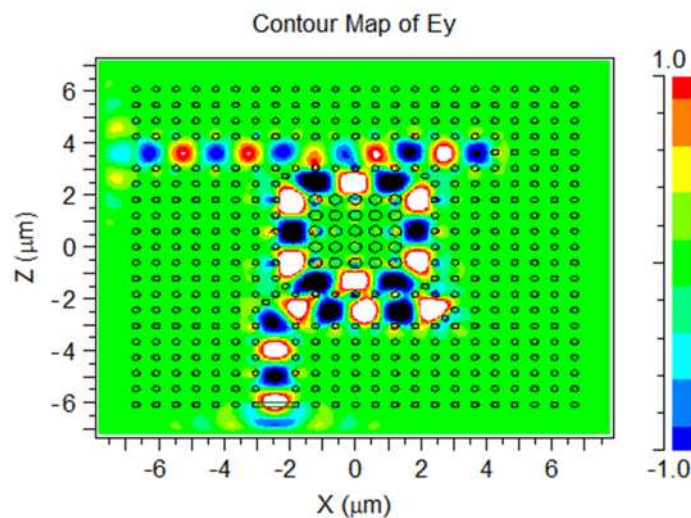
**Figure III.6:**(a) structure schématique du filtre. (b) son spectre de transmission.



Afin d'obtenir les caractéristiques de ce filtre, nous devons calculer le spectre de transmission de ce dernier. Pour ce faire, nous utilisons le logiciel Fullwave de Rsoft, basé sur la méthode des différences finies temporelles (FDTD).

La figure (III.6.b) représente le spectre de transmission du filtre. Sur cette figure, nous observons un pic résonant à la longueur d'onde  $\lambda = 1.5519 \mu\text{m}$ . Il est caractérisé par un taux de transmission de 98.02 % et un facteur de qualité de  $Q = 1724.22$ , qui sont nettement améliorés par rapport au cas du filtre sans l'introduction des tiges de dispersion, où ils étaient égaux à 96.9 % et 1410.81 respectivement.

Afin de démontrer la performance du filtre, on simule la distribution du champ dans ce composant pour la longueur d'onde  $\lambda = 1.5519 \mu\text{m}$ . Le résultat est représenté sur la figure (III.7). Comme on peut le remarquer, en raison du couplage entre le guide d'onde et le résonateur en anneau à la longueur d'onde de résonance, le signal est complètement extrait du guide d'onde d'entrée et transféré ensuite au guide d'onde de sortie via le résonateur.



**Figure III.7:** Représentation de la distribution du champ électrique pour le filtre pour  $\lambda = 1.5519 \mu\text{m}$ .

#### III.4.2. Etude de l'effet de plusieurs paramètres sur la longueur d'onde de sortie du filtre :

Pour toute utilisation pratique des cristaux photoniques, il est nécessaire de modifier la réponse optique des dispositifs à cristaux photoniques, afin de fabriquer des dispositifs accordables (par exemple des filtres accordables). De nombreuses études ont été réalisées dans le but d'accorder la longueur d'onde de fonctionnement dans différentes conceptions des filtres à cristaux photoniques [50, 51, 52]. De manière générale, on peut modifier l'indice



de réfraction de toute la structure, l'indice de réfraction des tiges intérieures, le rayon des tiges intérieures et de la structure entière. En agissant sur l'un de ces paramètres, on peut contrôler la longueur d'onde de sortie de la structure.

Dans notre étude nous allons montrer la possibilité d'accorder la réponse du filtre à cristaux photoniques en modifiant l'indice de réfraction de toute la structure et du rayon des tiges intérieures.

Le premier paramètre que nous allons modifier est l'indice de réfraction des tiges de toute la structure ( $n$ ). Le tableau (III.1) indique les changements obtenus.

Indice de réfraction ( $n$ )	2.86	2.88	2.90	2.92	2.94	2.96
Longueur d'onde ( $\mu\text{m}$ )	1.5475	1.5497	1.5519	1.5547	1.5564	1.5587

**Tableau III.1:** influence de l'indice ( $n$ ) sur la longueur d'onde de sortie du filtre.

Le rayon des tiges est un autre paramètre qui peut être utilisé pour accorder le filtre. Les résultats obtenus sont reportés sur le tableau (III.2).

Rayon des tiges intérieures ( $\mu\text{m}$ )	0.182	0.185	0.188	0.191	0.194	0.197
Longueur d'onde de sortie ( $\mu\text{m}$ )	1.5477	1.5499	1.5519	1.5538	1.5559	1.5577

**Tableau III.2 :** influence du rayon 'R' sur la longueur d'onde de sortie du filtre.

D'après les tableaux ci-dessus, on remarque qu'en augmentant l'indice de réfraction des tiges de la structure et du rayon des tiges intérieures, la valeur de la longueur d'onde de sortie se décale vers des valeurs plus élevées. Ces résultats mettent en évidence la possibilité de concevoir un filtre accordable.

### III.5. Démultiplexeur à base de résonateurs en anneaux à cristaux photoniques :

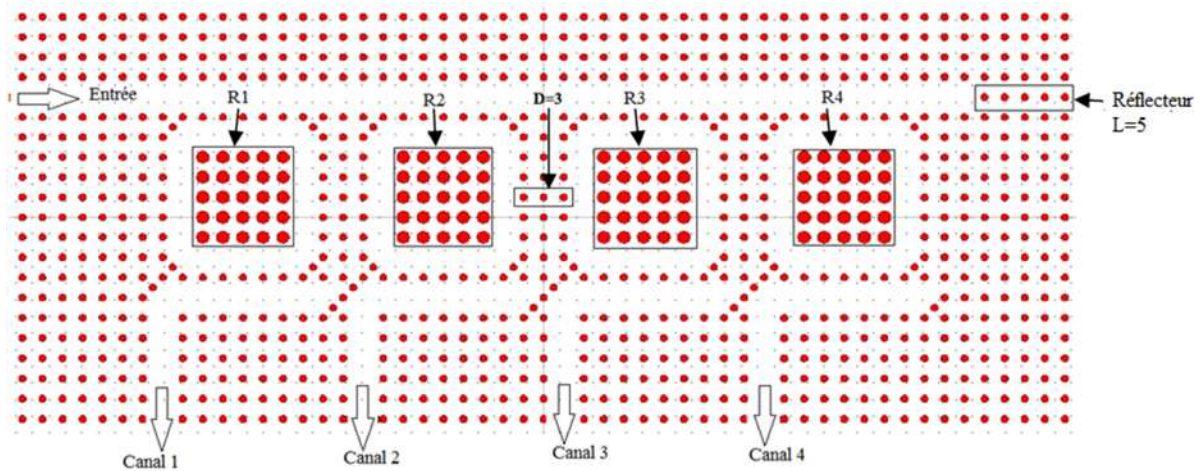
En se basant sur les résultats obtenus précédemment, nous proposons de concevoir deux topologies de démultiplexeurs à base de cristaux photoniques bidimensionnels.

#### III.5.1. Première topologie :

La première structure du démultiplexeur que nous proposons est représentée sur la figure (III.8). Le démultiplexeur proposé est capable de séparer quatre longueurs d'onde. Il est constitué d'un guide d'onde d'entrée et de quatre canaux de sortie, entre lesquels sont situés quatre résonateurs en anneaux de forme carrée. La sélection de la longueur d'onde de

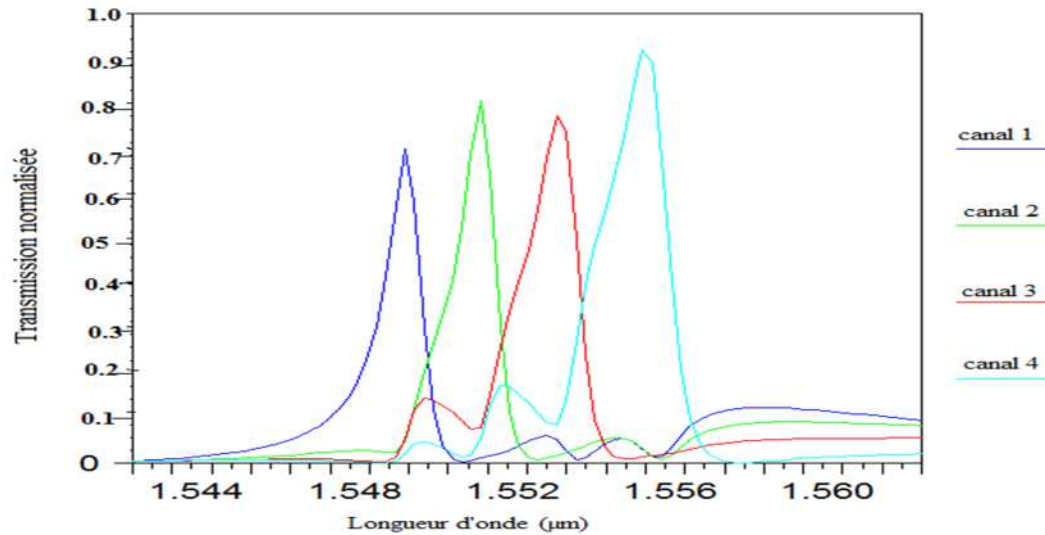
sortie pour chaque canal se fait par la variation du rayon des tiges intérieures de chaque résonateur.

Pour cela, nous avons considéré les rayons suivant :  $R_1=0.185\mu\text{m}$ ,  $R_2=0.188\mu\text{m}$ ,  $R_3=0.191\mu\text{m}$ ,  $R_4=0.194\mu\text{m}$  pour les canaux 1, 2, 3, 4, respectivement. Initialement, la distance entre chaque résonateur est choisie égale à trois colonnes de tiges ( $D=3$ ), et la longueur du réflecteur est de cinq tiges ( $L=5$ ).



**Figure III.8:** Représentation schématique du démultiplexeur pour  $D=3$  et  $L=5$ .

Après avoir simulé cette structure en utilisant le logiciel Fullwave, nous avons reportés les résultats obtenus sur la figure (III.9) Selon cette figure, nous observons l'existence de quatre pics résonants à  $\lambda_1= 1.5499 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_2=1.5519 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_3=1.5538 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_4=1.5559 \mu\text{m}$ , obtenues à la sortie des canaux 1, 2, 3, 4, respectivement. Ces pics sont caractérisés par les taux de transmission suivant :  $T_1=70.05 \%$ ,  $T_2=81.90 \%$ ,  $T_3=78.16 \%$ ,  $T_4=93.37 \%$ , respectivement.



**Figure III.9** : Spectre de transmission du démultiplexeur pour  $D=3$  et  $L=5$ .

Les spécifications des quatre longueurs d'onde sont indiquées dans le tableau (III.3) :

Canal	$\lambda(\mu\text{m})$	Transmission (%)	Facteur de qualité (Q)	Diaphonie (dB)
1	1.5499	70.05	1549.9	-7.5395
2	1.5519	81.90	1410.7272	-7.4925
3	1.5538	78.16	970.8125	-6.8198
4	1.5559	93.37	740.9047	-13.2792

**Tableau III.3** : Caractéristiques du démultiplexeur pour  $D=3$  et  $L=5$ .

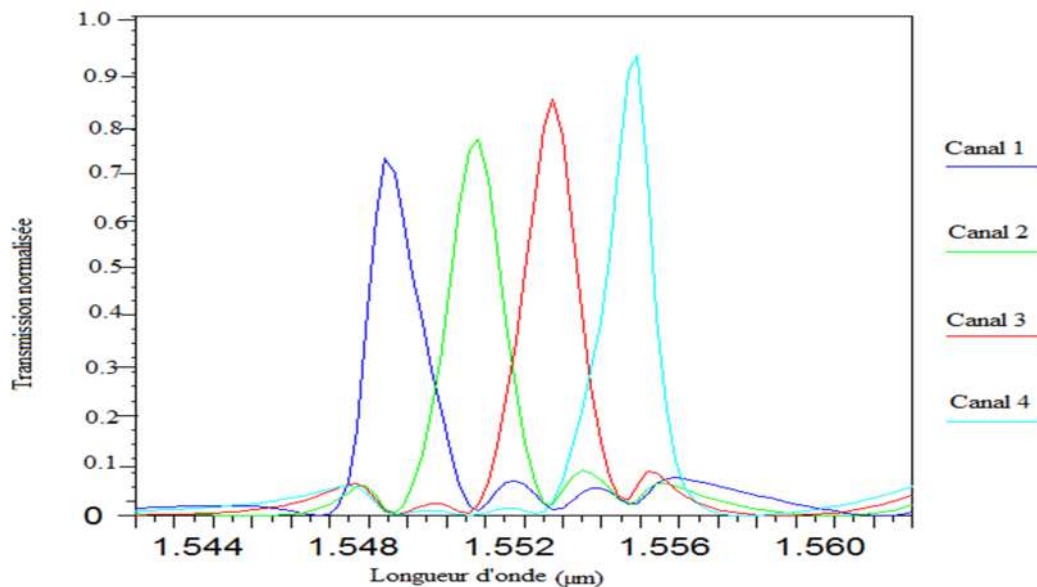
D'après ce tableau, on constate que le niveau de diaphonie entre les canaux de la structure est compris entre -13.2792 et -6.8198 dB. Ce résultat n'est pas satisfaisant, car on note la présence du signal d'un canal particulier dans les autres canaux.

L'étude suivante porte sur l'optimisation du démultiplexeur conçu afin d'améliorer les taux de transmission et de réduire au maximum le Crosstalk. Pour ce faire, nous avons joué sur la distance séparant les différents résonateurs. Le tableau (III.4) résume les résultats obtenus, en considérant trois différentes distances  $D=3$ ,  $D=4$  et  $D=5$ .

Distance	D= 3		D=4		D=5	
	T(%)	CT (dB)	T(%)	CT (dB)	T(%)	CT (dB)
Canal 1	70.05	-7.5395	60.01	-4.9862	73.87	-9.0211
Canal 2	81.90	-7.4925	68.37	-5.001	76.18	-13.2502
Canal 3	78.16	-6.8198	59.10	-5.0463	86.55	-10.9485
Canal 4	93.37	-13.2792	47.15	-5.890	95.14	-9.1957

**Tableau III.4 :** Caractéristiques du démultiplexeur proposé pour différentes valeurs de ‘D’.

Les résultats reportés sur ce tableau montrent une amélioration notable du taux de transmission pour une distance égale à D=5. Nous enregistrons également un faible niveau de diaphonie pour la même distance. Dans ce cas, le spectre de transmission pour les quatre canaux est illustré sur la figure (III.10).



**Figure III.10:** Spectre de transmission du démultiplexeur pour D=5 et L=5.

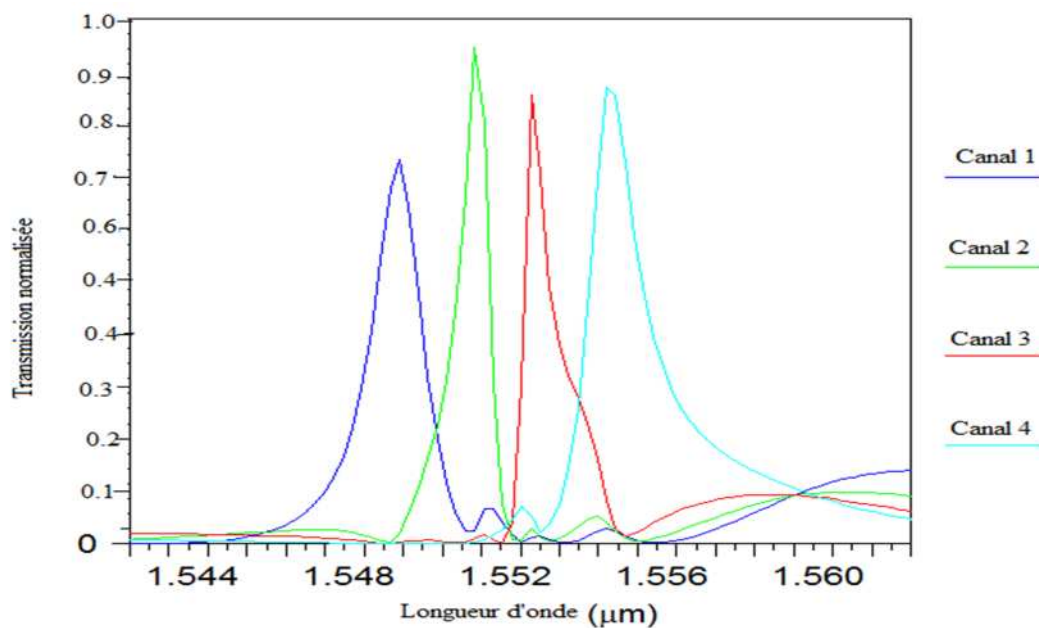
Une autre amélioration des caractéristiques du démultiplexeur peut être établie en agissant sur la longueur du réflecteur, autrement dit, la distance entre le réflecteur et les résonateurs. Pour ce faire, nous avons simulé notre structure pour différentes longueurs du réflecteur, en maintenant la distance entre les résonateurs égale à D=5. Le résultat est reporté sur le tableau (III.5).

Longueur du réflecteur	L =4		L =5		L =6	
	T(%)	CT (dB)	T(%)	CT (dB)	T(%)	CT (dB)
Canal 1	74.2	-14.1497	73.87	-9.0211	88.9	-17.0812
Canal 2	95.7	-13.4242	76.18	-13.2502	85.14	-9.008
Canal 3	86.9	-9.0718	86.55	-10.9485	75.02	-11.5746
Canal 4	88.6	-7.2	95.14	-9.1957	80.8	-9.4864

**Tableau III.5:**Caractéristiques du démultiplexeur proposé pour différentes valeurs de ‘L’.

Nous remarquons que la variation de la distance entre le réflecteur et les différents résonateurs influe sur les performances de notre composant. Les meilleures performances sont atteintes si les résonateurs sont placés à une distance bien choisie par rapport au réflecteur. Le meilleur résultat est relevé pour L=4.

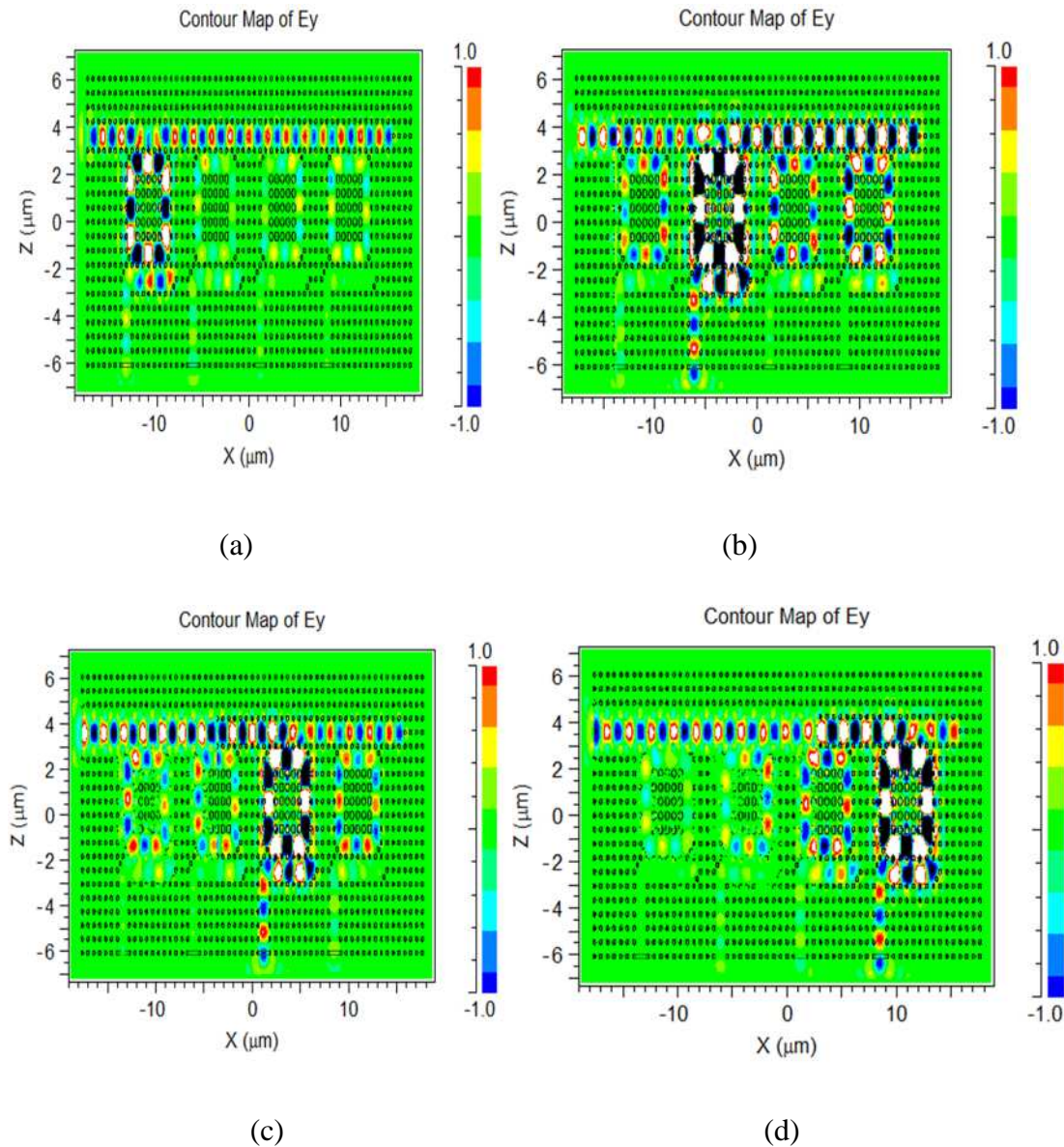
Les résultats obtenus précédemment nous permettent ainsi de déterminer précisément les nouveaux paramètres de notre structure. La structure du démultiplexeur optimisé est présentée sur la figure (III.11). Sur la figure, nous avons reporté les spectres de transmission associés aux différentes sorties du démultiplexeur. Cette figure montre clairement que pour un espacement de D=5 et une longueur du réflecteur L=4, les performances du démultiplexeur sont nettement améliorées par rapport au cas où D=3 et L=5 figure (III.9).



**Figure III.11:** Spectre de transmission du démultiplexeur optimisé pour D=5 et L=4.



La distribution du champ dans le démultiplexeur correspondant aux longueurs d'onde à la sortie des canaux 1, 2, 3 et 4, est représentée sur la figure(III.12). Sur cette figure, il est clairement visible que les longueurs d'onde  $\lambda_1=1.5499 \mu\text{m}$  ,  $\lambda_2= 1.5519 \mu\text{m}$  ,  $\lambda_3=1.5538 \mu\text{m}$  ,  $\lambda_4=1.5559 \mu\text{m}$  sont extraite du guide d'onde d'entrée et transférées aux guides d'onde de sortie par l'intermédiaire des quatre PCRRs.

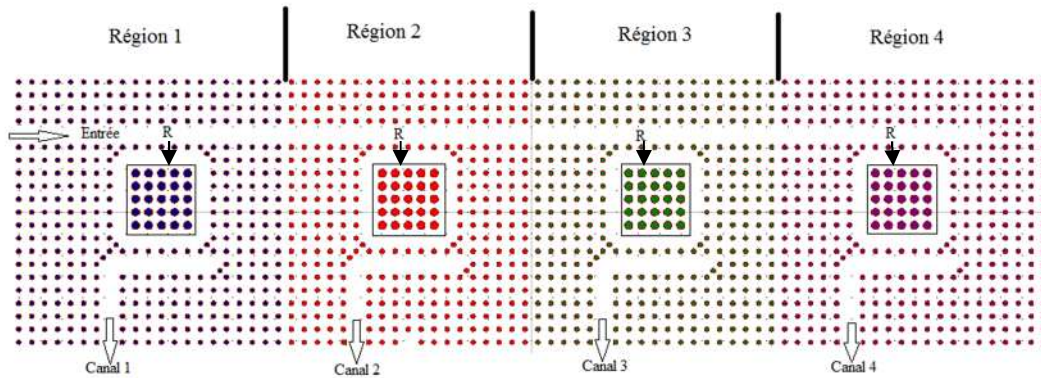


**Figure III.12 :** Représentation de la distribution du champ électrique pour le démultiplexeur pour (a) $\lambda_1=1.5499 \mu\text{m}$  , (b)  $\lambda_2= 1.5519 \mu\text{m}$  ,(c)  $\lambda_3=1.5538 \mu\text{m}$  ,(d)  $\lambda_4=1.5559 \mu\text{m}$ .

### III.5.2. Deuxième topologie :

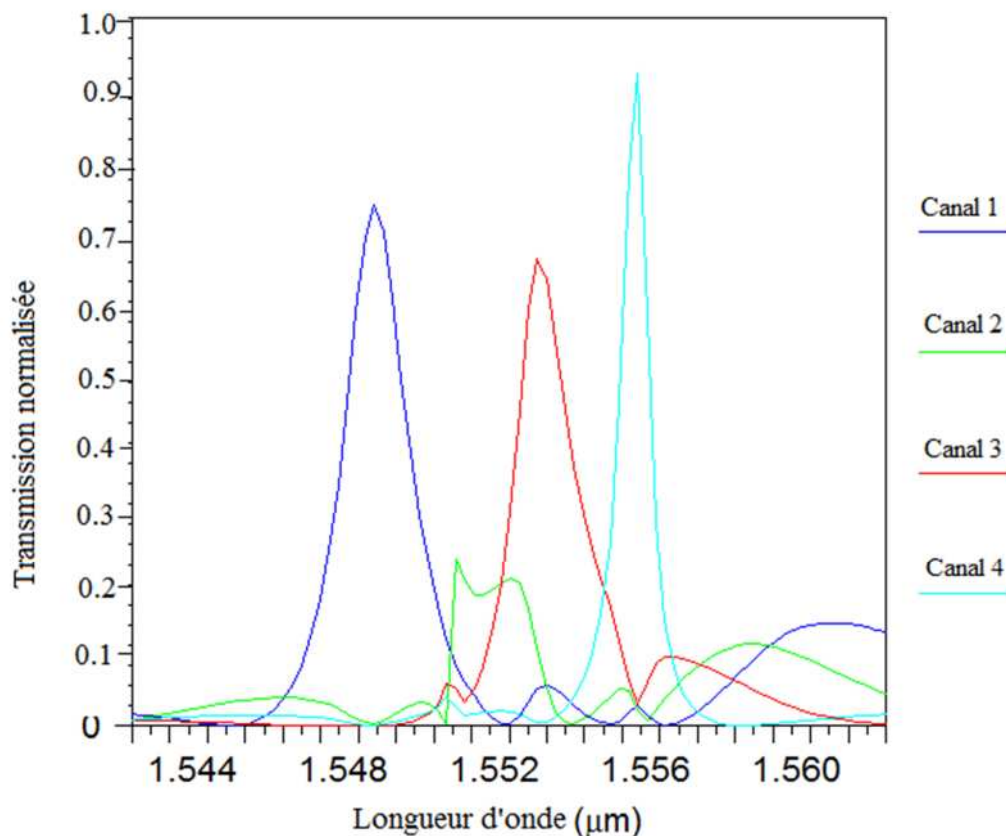
La deuxième structure du démultiplexeur proposé est représentée sur la figure (III.13). Ce démultiplexeur est appelé démultiplexeur à hétéro-structure parce qu'il contient

quatre régions d'indices de réfraction différents, d'où quatre longueurs d'onde de sortie différentes. Les indices de réfraction des régions 1, 2, 3 et 4 sont  $n_1 = 3.88$ ,  $n_2 = 3.90$ ,  $n_3 = 3.92$  et  $n_4 = 3.94$ , respectivement. Initialement, la distance entre chaque résonateur est choisie égale à douze colonnes de tiges ( $D=12$ ), et la longueur du réflecteur est de cinq tiges ( $L=5$ ).



**Figure III.13:** Structure schématique du démultiplexeur proposé pour  $D=12$  et  $L=5$ .

La figure (III.14) donne la réponse spectrale en transmission du démultiplexeur, selon cette figure nous observons l'existence de quatre pics résonants à  $\lambda_1 = 1.5494 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_2 = 1.5516 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_3 = 1.5538 \mu\text{m}$  et  $\lambda_4 = 1.5564 \mu\text{m}$ , obtenus à la sortie des canaux : 1, 2, 3 et 4, respectivement.



**Figure III.14:** Spectre de transmission du démultiplexeur optimisé pour D=12 et L=5.

Le détail des caractéristiques des quatre longueurs d'onde est résumé dans le tableau(III.6):

canal	$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	Transmission (%)	Facteur de qualité Q	Crosstalk (dB)
1	1.5494	77.1	860.7777	-18.2190
2	1.5516	24.50	705.2727	-3.6115
3	1.5538	68.05	914.00	-6.1261
4	1.5564	95.8	1729.3333	-10.2059

**Tableau III.6:** Caractéristiques du démultiplexeur pour D=12 et L=5.

Selon ces résultats, il est clair que la transmission est faible pour les trois premiers canaux et que le niveau de diaphonie est élevé. Pour améliorer ces résultats, on suit la même procédure utilisée pour la première topologie, nous commençons par la modification de l'espacement entre les canaux. Ensuite, nous verrons l'influence de la longueur du réflecteur sur les caractéristiques du démultiplexeur.

Le tableau (III.7) ci-dessous résume les caractéristiques de notre dispositif pour différents espacements entre les résonateurs.

Distance	D = 9		D = 10		D = 12	
	T(%)	CT (dB)	T(%)	CT (dB)	T(%)	CT (dB)
Canal 1	19.23	-3.4222	84.05	-11.0590	77.1	-18.2190
Canal 2	65.79	-7.8488	83.1	-10.4125	24.50	-3.6115
Canal 3	57.9	-6.0688	78.8	-9.8539	68.05	-6.1261
Canal 4	97.20	-9.9464	98.1	-11.4735	95.8	-10.2059

**Tableau III.7 :** Caractéristiques du démultiplexeur proposé pour différentes valeurs de 'D'.

D'après les résultats du tableau, on constate que l'espacement entre les canaux agit sur les caractéristiques du démultiplexeur. On retient comme résultat optimal l'espacement de D=10.

L'étape suivante consiste à optimiser la distance entre le réflecteur et les résonateurs, en considérant dans nos calculs la valeur optimale de « D » obtenue précédemment. Dans le



tableau (III.8) sont indiquées les caractéristiques du démultiplexeur pour différentes valeurs de la longueur du réflecteur.

Longueur du réflecteur	L = 3		L = 4		L = 5	
	T(%)	CT (dB)	T(%)	CT (dB)	T(%)	CT (dB)
Canal 1	17.3	-4.9115	67.9	-16.3993	84.05	-11.0590
Canal 2	76.8	-8.3493	88.5	-15.0009	83.1	-10.4125
Canal 3	68.1	-11.9114	68.3	-10.3735	78.8	-9.8539
Canal 4	82.9	-11.7377	81.03	-10.8285	98.1	-11.4735

Tableau III.8 : Caractéristiques du démultiplexeur proposé pour différentes valeurs de 'L'.

Nous remarquons que la variation du nombre de tiges appartenant au réflecteur influe sur les performances de notre démultiplexeur. Le meilleur résultat est relevé pour L=5.

Les techniques d'amélioration utilisées précédemment nous permettent ainsi de déterminer précisément l'espacement et la longueur du réflecteur optimaux de la nouvelle structure. La structure du démultiplexeur optimisé est présentée sur la figure (III.15).

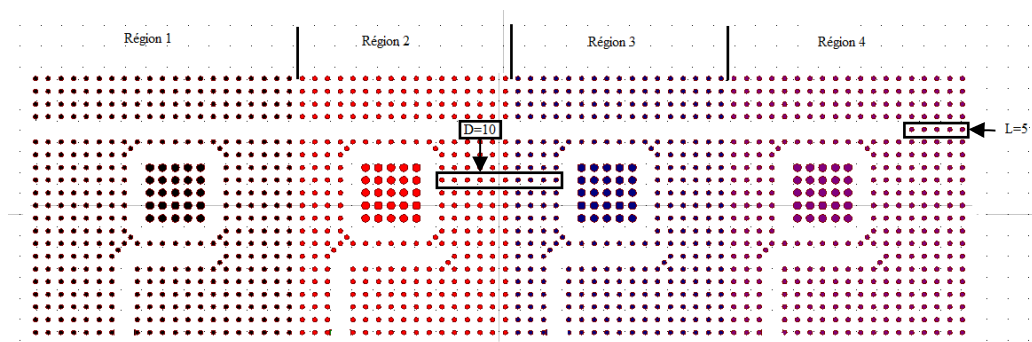
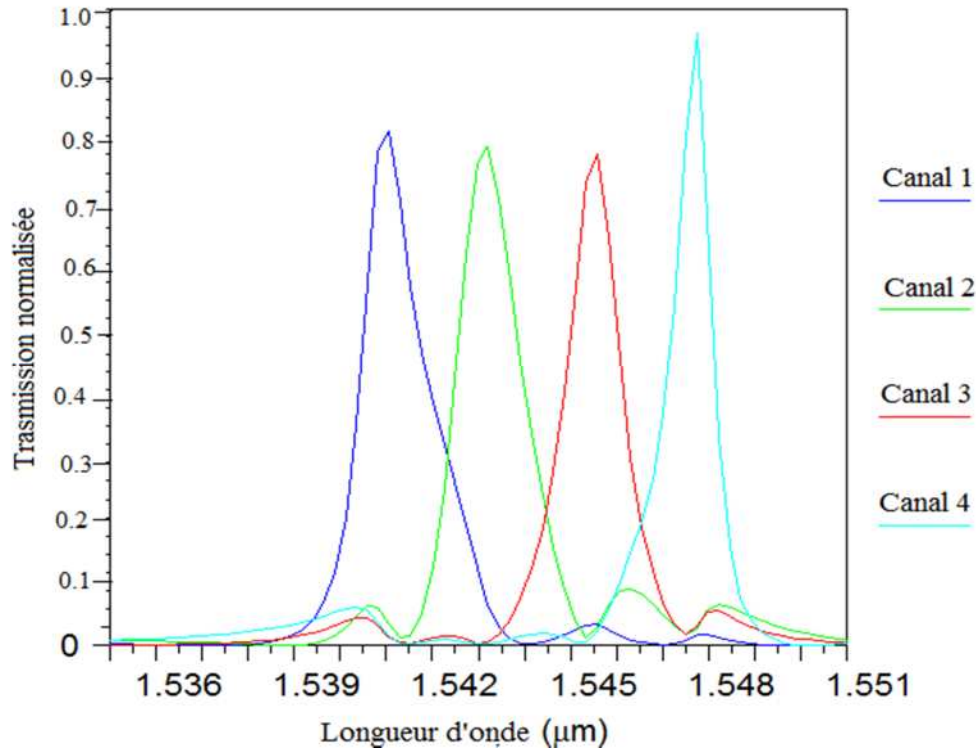


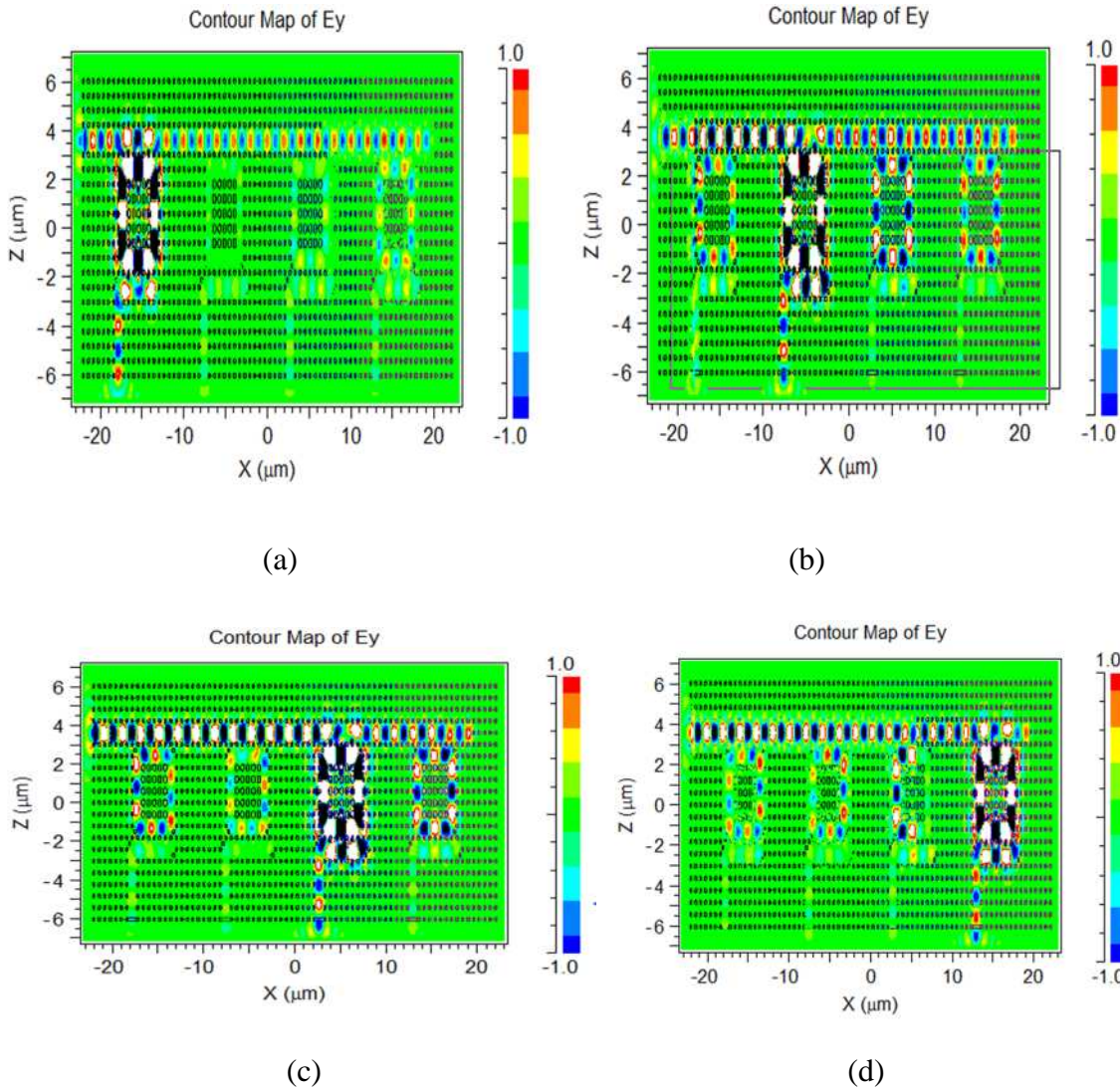
Figure III.15: structure schématique du démultiplexeur optimisé.

Sur la figure (III.16), nous avons reporté les spectres de transmission associés aux différentes sorties du démultiplexeur. Cette figure montre clairement que pour un espacement de D=10 et une longueur du réflecteur L=5, les performances du démultiplexeur sont nettement améliorées par rapport au cas où D=12 et L=5 figure (III.14).



**Figure III.16:** Spectre de transmission du démultiplexeur optimisé pour D=10 et L=5.

La distribution du champ dans le démultiplexeur correspondant aux longueurs d'onde à la sortie des canaux 1, 2, 3 et 4, est représentée sur la figure(III.17). Sur cette figure, il est clairement visible que les longueurs d'onde pour  $\lambda_1=1.5494 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_2= 1.5516 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_3=1.5538 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_4=1.5564 \mu\text{m}$  sont extraite du guide d'onde d'entrée et transférées aux guides d'onde de sortie par l'intermédiaire des quatre PCRRs.



**Figure III.17:** Représentation de la distribution du champ électrique pour le démultiplexeur pour (a)  $\lambda_1=1.5494 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_2= 1.5516 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_3=1.5538 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_4=1.5564 \mu\text{m}$

### III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons essayé de développer deux configurations différentes de démultiplexeurs à base de cristaux photoniques bidimensionnels. Les deux dispositifs comportent quatre résonateurs en anneaux à cristaux photoniques. Afin d'améliorer les performances des démultiplexeurs, nous avons optimisé l'espacement entre les canaux et la longueur du réflecteur situé à l'extrémité du guide d'onde d'entrée. Les résultats obtenus assurent l'efficacité des composants proposés.



# **Conclusion Générale**

### Conclusion Générale

Ce mémoire met en relief l'intérêt de l'utilisation des cristaux photoniques (CPs) pour le démultiplexage en longueurs d'onde. Ces matériaux possèdent une variation périodique de l'indice de réfraction. En raison de cette périodicité, les CPs possèdent des bandes photoniques qui interdisent la propagation de certaines longueurs d'ondes dans le matériau. Les cristaux photoniques ont été intensivement exploités en tant que guides d'onde, cavités résonantes, fibres optiques, miroirs de Bragg, etc...

Au cours de ce travail, nous nous sommes attachés à l'étude de composants optiques à base de CP-2D. En particulier, nous avons cherché à concevoir des démultiplexeurs qui sont des composants photoniques élémentaires indispensables au bon fonctionnement de la circuiterie photonique.

Dans un premier temps, nous avons rappelé les principes de base liés aux cristaux photoniques, où nous avons présenté brièvement les différents types de cristaux photoniques, ainsi que leurs propriétés électromagnétiques et leur différent mode d'utilisation en présentant la méthode d'ingénierie de cristaux photoniques, telle que l'exploitation des diagrammes de bandes pour calculer la bande interdite photonique, et l'exploiter afin de concevoir des composants utiles dans le domaine d'optique intégrée.

Par la suite nous avons défini le principe de démultiplexage à cristaux photoniques suivi par la présentation succincte de quelques exemples d'application dans lesquels sont utilisés des différentes configurations des démultiplexeurs à cristaux photoniques.

Dans la dernière partie de ce travail, nous avons développé deux configurations des démultiplexeurs quatre canaux en utilisant la méthode des différences finies (FDTD-2D). Les deux démultiplexeurs sont basés sur le couplage entre guides d'onde et résonateurs en anneaux à cristaux photoniques. Une discussion autour des paramètres permettant l'amélioration du fonctionnement de ces composants a été mise au point. Le but étant d'ajuster ces paramètres afin d'obtenir les meilleures performances possibles.

## Références Bibliographiques :

- [1,2] E.YABLONOVITCH, “Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics”, Phys. Rev. Lett. 58, 2059, (1987).
- [2] E.YABLONOVITCH, T.J. GMITTER, and K.M. LEUNG. “Physical Review Letters 67(17), 2295– 2298”.
- [3] E.YABLONOVITCH, «Photonic band-gap crystals», J. Phys. Condens. Matter, vol.5, pp.2443- 2460, (1993).
- [4] ABRI née H. BADAOU, “Etude et Conception des Micro-composants à Base des Cristaux Photonique Bidimensionnels”, Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, Décembre 2012.
- [5] J.D. JOANNOPOULOS, R.D. MEADE, AND J.N. WINN. « Photonic Crystals, Molding the Flow of Light ». Princeton University Press, (1995).
- [6] B. LOMBARDET, « Étude Et Réalisation De Cristaux Photoniques Pour L'optique Intégrée », Thèse De Doctorat, École Polytechnique Fédérale De Lausann, 2005.
- [7] R. NAOUM, S. BOUAMAMI, F. SALAH- BELKHODJA, « Study of a demultiplexer based on photonic crystals », J. Mater. Environ. Sci. 1 (S1) (2010) 313-316.
- [8] A. BENMERKHI. “Optimisation du confinement de la lumière dans des cavités à cristaux photoniques”. Thèse de Doctorat, université Mentouri Constantine. 2012.
- [9] L. FERRIER, “Micro-nano structures à base de cristaux photoniques pour le contrôle 3D de la lumière” thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, France 2008.
- [10] R.DEGHDAK, « études des propriétés physiques dans les cristaux magnéto photonique », thèse de doctorat, université Mentouri Constantine, 2018.
- [11] R.BENDJELLOUL, « Etude et caractérisation de circuits photoniques à base de cristaux photoniques de micro piliers : Application aux filtres à base de résonateurs », thèse de doctorat, université Mentouri Constantine, 2017.
- [12] Y.DESIERES, « conception et études optiques des composants micro photoniques sur matériaux III-V à base de structures à bandes interdite de photon », thèse de doctorat n°01-0081, Institut national des sciences appliquées de Lyon, décembre 2001.

- [13] J.D. JOANNOPOULOS, R. D. MEADE, J. N. WINN, "Photonic Crystals- Molding the Flow of Light". Princeton University Press, Princeton, NJ, 2008.
- [14] M.Grillet, « cristaux photoniques et intégration photonique ». Thèse de doctorat de l'université de Lyon ,2003.
- [15] C.J.M. SMITH T AL, Coupled guide and cavity in a two-dimensional photonic crystal. Applied physics letters (2001).
- [16] S.GHAZALI, option: "Communication optique et micro-ondes » « conception et modelisation numerique de composants optiques en nano photoniques intégrée » université djillali liabes de sidi bel abbes, 2018.
- [17] TA BIRKS,GC KNIGHT,AND PS G RUSSELL, « endlessly single-mode photonic crystal fiber »,opt.lett.vol.22,pp.961-963,1997.
- [18] S.BOUAMAMI, « études des propriétés de dispersion dans les cristaux photoniques bidimensionnels : application a l'étude de différents types de démultiplexeurs en longueurs d'onde (WDM) »thèse de doctorat, université djillali liabes de sidi bel abbes, 2015.
- [19] K.IWAMOTO and L.KAMATA, « pressure sensor using optical fibers applied optics », 29(3),ganuary 1990.
- [20]F.METEHRİ « contribution à l'étude de composantes optique pour des applications en optique intégrée », thèse de doctorat, université djillali liabes de sidi bel abbes, 2019.
- [21] Y.BENACHOUR « Optimisation de cristaux photoniques pour l'optique non linéaire », thèse de doctorat, université de paris sud 11 ,2008.
- [22] F.Z MIROUH « modélisation de l'influence des paramètres physiques et géométriques dans des structures périodiques: application à un démultiplexeur. », thèse doctorat, université freres mentouri-costantine1.2020.
- [23] KH.BENDEMAGH « Etude de dimensionnement d'un coupleur à base de cristaux photoniques destiné aux systèmes de communications »thèse doctorat, université ferhat abbas– setif 1 .2019.



- [24] S. DAVID, « Etude de composants à cristaux photoniques dans la filière silicium pour les longueurs d'ondes des télécommunications optiques », Thèse de doctorat, Université Paris XI, 2003.
- [25] Y. AKAHANE, M. MOCHIZUKI, T. ASANO, Y. TANAKA et S. NODA, “Design of a channel drop filter by using a donor-type cavity with high-quality factor in a two dimensional photonic crystal slab”, *App. Phys. Lett.* , vol.82, N°9, p.1341-1343, 2003.
- [26] F. LALLAM « conception des nouvelles topologies des démultiplexeurs sélectifs à plusieurs canaux en longueurs d'ondes à base de cristaux photoniques bidimensionnels cps-2d »thèse de doctorat, université abou bakr belkaïd– tlemcen –,2019.
- [27] J . GHALBOUNI , « Distribution multiutilisateur de paires de photons intriqués aux longueurs d'onde des télécommunications », Thèse Doctorat, école de l'Institut Mines-Télécom - membre de ParisTech,2013 .
- [28] S.RAWAL, R.K. SINHA, “Design,analysis and optimization of silicon-on-insulator photonic crystal dual band wavelength demultiplexer”, *Optics Communications*, vol. 282, pp. 3889-3894, 2009.
- [29] S. GHEZALI, F. TAYEBOUN,K. A. MERADI, “Nine Channels Wavelength Division Demultiplexer Based upon Two Dimensional Photonic Crystal,” *Progress In Electromagnetics Research M*, Vol. 69, 107–114, 2018 .
- [30] Wu, Z., K. XIE, and H. YANG, “Band gap properties of two dimensional photonic crystals with rhombic lattice,” *Optik*, Vol. 123, 534–536, 2012.
- [31] D. NEEL, “Etude en champ proche optique de guides à cristaux photoniques sur SOI,” Thèse de doctorat, L“institut national des sciences appliquées de Lyon France, 2006.
- [32] A.E. AKOSMAN, M. MUTLU, H. KURT, E. OZBAY, “Dual-frequency division demultiplexer based on cascaded photonic crystal waveguides”, *Phys. B Condens. Matter*. 407 (2012) 4043–4047. doi:10.1016/j.physb.2012.02.024.
- [33] G. MANZACCA, D. PACIOTTI, A. MARCHESE, M.S. MOREOLO, G. CINCOTTI, “2D photonic crystal cavity-based WDM multiplexer, *Photonics Nanostructures “- Fundam. Appl.* 5 (2007) 164– 170. doi:10.1016/j.photonics.2007.03.003 .

- [34] A. ROSTAMI, H.A. BANAEI, F. NAZARI, A. BAHRAMI, “An ultra compact photonic crystal wavelength division demultiplexer using resonance cavities in a modified Y-branch structure”, *Opt. - Int. J. Light Electron Opt.* 122 (2011) 1481–1485.  
doi:10.1016/j.ijleo.2010.05.036.
- [35] H. ALIPOUR-BANAEI, F. MEHDIZADEH, S. SERAJMOHAMMADI, “A novel 4-channel demultiplexer based on photonic crystal ring resonators”, *Opt. - Int. J. Light Electron Opt.* 124 (2013) 5964–5967. doi:10.1016/j.ijleo.2013.04.117.
- [36] S. F. MINGALEEV, Y. S. KIVSHAR, “Nonlinear transmission and light localization in photonic-crystal waveguides,” *J. Opt. Soc. Am. B*, 19(9), 2241 (2002).
- [37] Y. AKAHANE, T. ASANO, B. S. SONG, ET S. NODA, “High-Q photonic nanocavity in a two- dimensional photonic crystal”, *Nature*, vol.425, N°6961, p.944–947, 2003.
- [38] F.MEHDIZADEH , M .SOROOSH , “A new proposal for eight-channel optical demultiplexer based on photonic crystal resonant cavities”, Springer Science+Business Media New York 2015, DOI 10.1007/s11107-015-0531-1.
- [39] H. Absalan, “A Four-Channel Optical Demultiplexer Using Photonic Crystal-Based Resonant Cavities,” *J. Opt. Commun* , 39(4): 369–373 2018.
- [40] Z. QIANG, W. ZHOU, R.A. SOREF. “Optical add-drop filters based on photonic crystal ring resonators,” *Optics Express*, vol. 15, pp. 1823–1831, 2007 .
- [41] A .BENMERKHI , « optimisation du confinement de la lumière dans des cavités a cristaux photoniques »,Thèse Doctorat, Université Mentouri – Constantine,2012 .
- [42] L.GHISA. « Couplage de micro résonateurs. Applications aux fonctions optiques de traitement du signal ». Physique [physics], These Doctorat Université Rennes 1, 2008
- [43] Y.F. XIAO, B. MIN, X. JIANG, C.H. DONG, L. YANG, “Coupling whispering-gallery-mode micro cavities with modal coupling mechanism,” *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 44, pp. 1065–1070, 2008.
- [44] F.MEHDIZADEH, M.SOROOSH, H.ALIPOUR-BANAEI, “An optical demultiplexer based on photonic crystal ring resonators”, *Optik - International Journal for Light and Electron Optics* <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.06.086>.

- [45] MAHMOUD YUCEF MAHMOUD , B.GHAOUTI , F.METEHRİ, « channel drop filter using photonic crystal ring resonators for CWDM » *optik* , volume 125, page 4718-4721,2014.
- [46] V. FALLAHI,M.SEIFOURI « Novel Four-Channel All Optical Demultiplexer Based on Square PhCRR for Using WDM Applications » ,*Journal of Optoelectrical Nanostructures*, Vol. 3, No. 4, 2018.
- [47] A.GHAFFARI, F. MONIFI, M.DJAVİD, M.S. ABRİSHAMIAN, « Analysis of Photonic Crystal Power SplitterswithDifferent Configurations », *Journal of Applied Sciences*, vol. 8, pp. 1416–1425, 2008.
- [48] A. MEKİS, J. C. CHEN, I. KURLAND, S. FAN, P. R. VILLENEUVE, J. D. JOANNOPOULOS, « High Transmission through Sharp Bends in Photonic Crystal Waveguides », *PhysicalReviewLetters*, vol. 77, pp. 3787–3790, 1996.
- [49] V.D. Kumar, T. Srinivas, A. Selvarajan « Investigation of ring resonators in photoniccrystal circuits », *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*, vol. 2, pp. 199–206, 2004.
- [50] S. ROBINSON, R. NAKKEERAN, « Two dimensional Photonic Crystal Ring Resonator based Add Drop Filter for CWDM systems », *Optik*, vol. 124, pp. 3430–3435, 2013.
- [51] M.R. RAKHSHANI, M.A. MANSOURI-BİRJANDI, « Realization of tunable optical filter by photonic crystal ring resonators »,*Optik*, vol. 124, pp. 5377– 5380, 2013.
- [52] F. MEHDIZADEH, H. ALIPOUR-BANAEI, S. SERAJMOHAMMADI, « Channel-drop filter based on a photonic crystal ring resonator »,*Journal of Optics*, vol. 15, pp. 075401, 2013.

## **Résumé**

Les cristaux photoniques sont des nano-structures diélectriques, dont l'indice de réfraction varie périodiquement à l'échelle de la longueur d'onde. Ces structures ont la capacité d'empêcher la propagation de la lumière pour certaines gammes de longueurs d'ondes appelées bandes interdites photoniques. La possibilité de créer des défauts au sein de ses structures donne à ces dernières l'avantage de contrôler et de confiner la lumière.

Dans le présent travail, nous nous sommes focalisés sur l'étude des démultiplexeurs à base de résonateurs en anneaux à cristaux photoniques. Les démultiplexeurs sont basés sur le couplage entre les guides d'onde et les résonateurs en anneaux à cristaux photoniques. Les propriétés de ces dispositifs sont numériquement étudiées en utilisant la méthode 2D-FDTD.

### **Mots clés :**

Cristaux photoniques, bande interdite photonique, démultiplexeur, résonateur en anneaux à cristaux photoniques.

## **Abstract**

Photonic crystals are dielectric nano-structures, whose refractive index varies periodically at the wavelength scale. These structures have the ability to prevent the propagation of light for certain ranges of wavelengths, called photonic band gaps. The ability to create defects within these structures gives them the advantage of controlling and confining light.

In the present work, we focused on the study of demultiplexers based on photonic crystals ring resonators. These demultiplexers are based on the coupling between waveguides and photonic crystal ring resonators. The properties of these devices are numerically studied using the 2D-FDTD method.

### **Keywords:**

Photonic crystals, photonic band gap, demultiplexer, photonic crystals rings resonator.